

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ZIEGLENRISTEN KARSWEGAARD PEREIRA CALÁBRIA

QUALIDADE FÍSICA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM SISTEMAS DE  
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB SEMEADURA DIRETA E LIVRES DE  
PESTICIDAS

CURITIBA

2021

ZIEGLENRISTEN KARSWEGAARD PEREIRA CALÁBRIA

QUALIDADE FÍSICA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM SISTEMAS DE  
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB SEMEADURA DIRETA E LIVRES DE  
PESTICIDAS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito  
parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência  
do Solo.

Orientador(a): Profa. Dra. Karina Maria Vieira  
Cavaliere Polizeli

Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo Guedes Filho

CURITIBA

2021

Calábria, Zieglenristen Karswegaard Pereira

Qualidade Física e matéria orgânica do solo em sistemas de produção agropecuária sob semeadura direta e livres de pesticidas. - Curitiba, 2021. 105f. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientação: Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli

Coorientação: Osvaldo Guedes Filho

1. Solos - Sustentabilidade. 2. Solos - Degradação. 3. Produção agropecuária. I. Polizeli, Karina Maria Vieira Cavalieri. II. Guedes Filho, Osvaldo III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -  
40001016014P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ZIEGLENRISTEN KARSWEGAARD PEREIRA CALÁBRIA** intitulada: **QUALIDADE FÍSICA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB SEMEADURA DIRETA E LIVRES DE PESTICIDAS**, sob orientação da Profa. Dra. KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERI POLIZELI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Fevereiro de 2021.

Assinatura Eletrônica

24/02/2021 15:57:21.0

KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERI POLIZELI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

24/02/2021 15:12:25.0

NERILDE FAVARETTO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/02/2021 14:54:31.0

MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica

24/02/2021 18:06:32.0

RACHEL MUYLAERT LOCKS GUIMARÃES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ - CAMPUS PATO BRANCO)

Assinatura Eletrônica

24/02/2021 14:55:53.0

ANDRÉ CARLOS AULER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5648 - E-mail: [pgcisol@ufpr.br](mailto:pgcisol@ufpr.br)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 76978

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prgp.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>  
e insira o código 76978

*À minha amada esposa Ana Paula, pela paciência, cuidado, atenção, carinho e  
companheirismo nessa importante fase de nossas vidas,*

*DEDICO.*

A cada produtor, técnico, professor, pesquisador, estudante e qualquer outra pessoa  
que tenha neste trabalho fonte para o aumento de produtividade e conhecimento,  
OFEREÇO.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por todas as bênçãos concedidas ao longo dessa minha caminhada.

À minha orientadora Profa. Dra. Karina Maria Vieira Cavaleri Polizeli pela dedicação, atenção e conselhos dados durante o período de orientação.

Ao meu coorientador Osvaldo Guedes Filho pela dedicação, amizade e disponibilidade para transmitir seus conhecimentos.

Ao Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária – NITA pela oportunidade de trabalhar na área experimental, obter uma visão sistemática da produção sustentável e pela ajuda no experimento.

À Universidade Federal do Paraná - UFPR, os campi Setor de Ciências Agrárias e Jandaia do Sul, pela infraestrutura e suporte para o desenvolvimento de nossas atividades nos laboratórios de física do solo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela contribuição à minha formação profissional.

Aos professores que participaram da banca de Qualificação e Defesa, os quais foram essenciais para o aprimoramento deste estudo, bem como para o meu crescimento profissional e pessoal.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação Agrisus – Agricultura Sustentável pelo apoio financeiro na execução desse trabalho.

À minha querida esposa Ana Paula por me apoiar a realizar este sonho, sempre com muita cumplicidade e carinho, tornando os meus dias mais felizes.

À minha filhinha de quatro patas, a Mell, sempre presente conosco com muita alegria e disposição, que inveja.

Aos meus familiares, especialmente aos meus sogros que, mesmo a distância, me deram afeto e carinho.

Às todos os meus colegas da pós-graduação que me ajudaram nas atividades de campo e laboratório, bem como compartilharam bons momentos dentro e fora da Universidade.

Aos amigos que me apoiaram de várias maneiras em diversas situações ao longo do curso.

Muito obrigado!

“É fundamental diminuir a distância entre o que se diz e o que se faz,  
de tal forma que, num dado momento, a tua fala seja a tua prática.”

Freire (2003, p.61).



## RESUMO

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) incluem uma série de práticas que intensificam a produção e proporcionam diversos benefícios ao meio ambiente. Diante disso, o objetivo geral foi analisar os efeitos dos sistemas de produção agropecuária (Lavoura, Pecuária, Floresta, Pecuária-Floresta e Lavoura-Pecuária-Floresta) na qualidade física do solo. O estudo foi realizado na área experimental do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária – NITA, localizada na Estação Experimental do Canguiri, pertencente à Universidade Federal do Paraná, no município de Pinhais-PR. Foram coletadas amostras de solo em três camadas (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) de cinco sistemas (Lavoura - L, Pecuária - P, Eucalipto - E, Pecuária-Floresta - PF e Lavoura-Pecuária-Floresta – LPF) no delineamento em blocos ao acaso. A amostragem foi realizada em dois transectos de 25 m cada, coletando-se cinco amostras por transecto, totalizando 10 amostras por camada. Para a qualidade física foram determinados os seguintes parâmetros: carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COam), avaliação visual da estrutura do solo (VESS), resistência tênsil dos agregados (RT), friabilidade do solo (F), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA). Já para a avaliação da qualidade física do solo foram determinados: condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), resistência do solo à penetração (RP), microporosidade (Mic), macroporosidade (Mac), densidade do solo ( $\rho_s$ ), capacidade de armazenamento de água no solo (CAAS), espaço poroso preenchido com água (EPPA), capacidade de aeração do solo (CAS), difusividade relativa do gás ( $D_s/D_0$ ) e índice de estabilidade estrutural (IEE). Todos os teores de COT foram classificados como muito alto ( $>20,0 \text{ g dm}^{-3}$ ) e por esta razão, poucas diferenças foram encontradas entre os tratamentos, pois os sistemas avaliados possuem alta adição de resíduos vegetais no solo. Para o VESS, a L apresentou a menor nota (1,43), enquanto as maiores notas foram nos sistemas E, LPF e PF (2,49, 2,30 e 2,39), respectivamente. Entretanto, todos os valores estão abaixo da nota considerada prejudicial ao desenvolvimento radicular das plantas (notas  $> 3$ ). O IEA não apresentou variação entre os sistemas e as camadas avaliadas, demonstrando menor sensibilidade às alterações proporcionadas pelos sistemas. A qualidade física do solo foi determinada pelo índice de qualidade física do solo (IQFS) para a camada de 0-0,20 m. Houve diferença significativa entre as notas médias de IQFS para os sistemas avaliados, sendo que o sistema simples Eucalipto, juntamente com a Lavoura, apresentaram a maiores notas de IQFS (0,87 e 0,81), respectivamente. Conclui-se que os sistemas de produção agropecuária, livres de pesticidas, são alternativas para a promoção da qualidade física do solo, porém são recomendadas para pequenos produtores rurais, devido as dificuldades de aplicabilidade em grandes áreas. Todos os sistemas avaliados propiciaram mudanças positivas nas propriedades, sendo que os sistemas simples E e L apresentaram as melhores condições física do solo.

Palavras-chave: Sustentabilidade do solo; Degradação do solo; Compactação; Cultivo simples; Sistemas Integrados de Produção Agropecuária.

## ABSTRACT

Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) include a series of practices that intensify production and provide several benefits to the environment. Therefore, the general objective was to analyze the effects of the agricultural production systems (Crop, Livestock, Eucalyptus, Livestock-Forest and Crop-Livestock-Forest) on the soil physical quality. The study was carried out at the experimental area of the Center for Technological Innovation in Agriculture - CTIA, located at the Experimental Station of Canguiri, at Federal University of Paraná, in Pinhais-PR city. Soil samples were collected in three layers (0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m) from five systems (Crop - C, Livestock - L, Eucalyptus - E, Livestock-Forest - LF and Integrated Crop-Livestock-Forest - ICLF) in a randomized block design. Sampling was carried out in two transects of 25 m each, with five per transect, totaling 10 per layer. For physical quality, the following parameters were determined: total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (COP), mineral-associated organic matter (MAOM), visual evaluation of soil structure (VESS), tensile strength of aggregates (TS), soil friability (F), weighted average diameter (WAD), geometric mean diameter (GMD) and the aggregate stability index (ASI). To assess the physical quality of the soil, saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), soil resistance to penetration (RP), microporosity (Mic), macroporosity (Mac), bulk density ( $\rho_s$ ), soil water storage capacity (SWSC), water-filled pore space (WFPS), soil aeration capacity (SAC), relative gas diffusivity ( $D_s/D_0$ ) and structural stability index (SSI). All TOC contents were classified as very high ( $> 20.0 \text{ g dm}^{-3}$ ) and for this reason, differences were found between treatments, as the incorporated systems have a high addition of plant residues in the soil. For VESS, C has the lowest score (1.43), while the highest scores were in the E, ICLF and LF systems (2.49, 2.30 and 2.39), respectively. However, all values are below the grade considered harmful to the root development of the plants (grades  $> 3$ ). The ASI does not vary between systems and as assessed layers, showing less sensitivity to the changes provided by the systems. The physical soil quality was provided by the soil physical quality index (SPQI) for a 0-0.20 m layer. There was a significant difference between the average SPQI scores for the systems evaluated, with E and C having the highest SPQI score (0.87 and 0.81), respectively. It is concluded that the agricultural production systems, pesticides-free, are alternatives for the promotion of physical quality of the soil, but they are recommended for small rural producers, due to the difficulties of applicability in large areas. All systems evaluated provided positive changes in properties, and the simple systems E and L presented the best physical soil conditions.

**Keywords:** Soil sustainability; Soil degradation; Compaction; Simple cultivation; Integrated Crop-Livestock Systems.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL DO NÚCLEO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM AGROPECUÁRIA (NITA), SITUADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL DO CANGUIRI DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, PINHAIS-PR. (FONTE: GOOGLE EARTH). L – LAVOURA; P – PECUÁRIA; FLORESTA – F; LF – LAVOURA-FLORESTA; LP – LAVOURA-PECUÁRIA; PF - PECUÁRIA-FLORESTA; LPF - LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA. AS SIGLAS ESCRITAS EM AMARELO SÃO OS SISTEMAS AVALIADOS, DIVIDIDOS EM TRÊS BLOCOS. ....	23
FIGURA 2. DADOS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA MÉDIA MENSAL NOS ANOS DECORRENTES DO EXPERIMENTO (2017, 2018 E 2019).....	24
FIGURA 3 – MAPA DE CONCENTRAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO (G DM-3) E A POSIÇÃO DOS TRANSECTOS NO EXPERIMENTO NA COR AMARELA.....	26
FIGURA 4 - POSIÇÕES DE ACOSTRAGEM DE SOLO NOS SISTEMAS INTEGRADOS PECUÁRIA-FLORESTA (PF) E LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF).....	27
FIGURA 5 – ESTOQUES TOTAIS DE CARBONO DO SOLO (ETC) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA – PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA – LPF) E CAMADAS (M).....	33
FIGURA 6 – COMPARAÇÃO DOS ESTOQUES TOTAIS DE CARBONO DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E REFERÊNCIA, NA CAMADA 0-20 M.....	34
FIGURA 7 - NOTAS DE QUALIDADE (EQ) MÉDIOS DA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA. LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (P < 0,05).....	34
FIGURA 8 – BILOT COMPONENTE 1 X COMPONENTE 2 SOBRE OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (A) E SOBRE AS VARIÁVEIS (B) PELA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	38
FIGURA 9 – A) DENSIDADE DO SOLO ( $\rho_s$ , Mg m <sup>-3</sup> ), B) RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP, MPa), C) AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS, Eq), NAS CAMADAS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF).....	64
FIGURA 10 –A) MICROPOROSIDADE (Mic, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ), B) CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (CAAS), C) ESPAÇO POROSO PREENCHIDO DE ÁGUA (EPPA) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO	

AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF) E NAS CAMADAS....66

FIGURA 11 – A) MACROPOROSIDADE ( $Mac$ ,  $m^3 m^{-3}$ ), B) CAPACIDADE DE AERAÇÃO NO SOLO ( $CAS$ ), C) DIFUSIVIDADE RELATIVA DO GÁS ( $DS/D_0$ ) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF) E NAS CAMADAS.....67

FIGURA 12 – A) CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO ( $K_s$ ,  $mm h^{-1}$ ), B) CARBONO ORGÂNICO DO SOLO ( $COS$ ,  $g dm^{-3}$ ), C) ÍNDICE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL ( $IEE$ , %) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF) E NAS CAMADAS....68

FIGURA 13 – FUNÇÕES FÍSICAS DO SOLO E ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO ( $IQFS$ ) REFERENTES AOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF).....70

FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA COMPARAÇÃO DAS FUNÇÕES FÍSICAS DO SOLO E DO ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA: A) LAVOURA (L) X LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF), B) PECUÁRIA (P) X PECUÁRIA-FLORESTA (PF) X LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF), C) EUCALIPTO (E) X PECUÁRIA-FLORESTA (PF) X LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF) NA CAMADA DE 0,20 M.....71

FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS NOTAS DOS INDICADORES FÍSICOS DO SOLO ( $\rho_s$  - DENSIDADE DO SOLO,  $RP$  - RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO,  $VESS$  - AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO,  $Mic$  - MICROPOROSIDADE,  $CAAS$  - CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO,  $EPPA$  - ESPAÇO POROSO PREENCHIDO DE ÁGUA,  $Mac$  - MACROPOROSIDADE,  $CAS$  - CAPACIDADE DE AERAÇÃO NO SOLO,  $DS/D_0$  - DIFUSIVIDADE RELATIVA DO GÁS,  $K_s$  - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO,  $COS$  - CARBONO ORGÂNICO DO SOLO E  $IEE$  - ÍNDICE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL) NAS FUNÇÕES FÍSICAS DO SOLO: A) F (I), B) F (II), C) F (III), D) F (IV) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (L - LAVOURA, P - PECUÁRIA, E - EUCALIPTO, PF - PECUÁRIA-FLORESTA, LPF - LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA) NA CAMADA DE 0-0,20 M.....72

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT), CARBONO ORGÂNICO PARTICULADO (COP) E CARBONO ORGÂNICO ASSOCIADO AOS MINERAIS (CO <sub>am</sub> ) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA – PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA – LPF) E CAMADAS. LETRAS MAIÚSCULAS DENTRO DE CADA CAMADA COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY (P<0,05). ns NÃO SIGNIFICATIVO.....	32
TABELA 2 - RESISTÊNCIA TÊNIL DE AGREGADOS (RT), FRIABILIDADE DO SOLO (F), DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO (DMP), DIÂMETRO MÉDIO GEOMÉTRICO (DMG) E ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE AGREGADOS (IEA) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA – PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA – LPF) E NAS CAMADAS.....	36
TABELA 3 – COMPONENTES PRINCIPAIS (PCS), AUTOVALORES, PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA EXPLICADA E PROPORÇÃO ACUMULADA (%) PELOS COMPONENTES, E PROPORÇÃO DA VARIÂNCIA (%) E CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS DENTRO DE CADA COMPONENTE.....	37
TABELA 4 – LIMITES DOS INDICADORES DO SOLO E CURVAS DE PONTUAÇÃO.....	62
TABELA 5 – MODELO DA ESTRUTURA APLICADA PARA O DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO (IQFS).....	63

## **LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ps - Densidade do Solo  
CAAS - Capacidade de Armazenamento de Água No Solo  
CAS – Capacidade de Aeração no Solo  
COam – Carbono Orgânico Associado aos Minerais  
COP – Carbono Orgânico Particulado  
COS – Carbono Orgânico do Solo  
COT – Carbono Orgânico Total  
DMG - Diâmetro Médio Geométrico  
DMP - Diâmetro Médio Ponderado  
Ds/D<sub>0</sub> - Difusividade Relativa do Gás  
E - Eucalipto  
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EPPA - Espaço Poroso Preenchido de Água  
F - Friabilidade do Solo  
GC – Grau de Compactação  
IEA - Índice de Estabilidade de Agregados  
IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná  
IEE - Índice de Estabilidade Estrutural  
IQFS – Índice de Qualidade Física do Solo  
Ks - Condutividade Hidráulica Saturada do Solo  
L - Lavoura  
LPF - Lavoura-Pecuária-Floresta  
Mac - Macroporosidade  
Mic - Microporosidade  
NITA – Núcleo de Inovação Tecnológica Agropecuária  
P - Pecuária  
PF - Pecuária-Floresta  
RP - Resistência do Solo à Penetração  
RT - Resistência Tênsil de Agregados  
SIPA - Sistemas Integrados de Produção Agropecuária  
VESS - Avaliação Visual da Estrutura do Solo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO I: ACÚMULO DE MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LIVRES DE PESTICIDAS SOB PLANTIO DIRETO.....</b>	<b>19</b>
1.1 RESUMO.....	19
1.2 ABSTRACT .....	20
1.3 INTRODUÇÃO .....	21
1.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
1.4.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL E EXPERIMENTO.....	23
1.4.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES DE SOLO.....	26
1.4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	31
1.5 RESULTADOS .....	31
1.6 DISCUSSÃO .....	38
1.7 CONCLUSÕES .....	45
1.8 REFERÊNCIAS.....	46
<b>2 CAPÍTULO II: QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LIVRE DE PESTICIDAS AGRÍCOLAS SOB PLANTIO DIRETO.....</b>	<b>53</b>
2.1 RESUMO.....	53
2.2 ABSTRACT .....	54
2.3 INTRODUÇÃO .....	55
2.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
2.4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA .....	58
2.4.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES DE SOLO.....	58
2.4.3 ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO.....	60
2.4.1 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	64
2.5 RESULTADOS .....	65
2.6 DISCUSSÃO .....	74
2.7 CONCLUSÕES .....	81
2.8 REFERÊNCIAS.....	82
<b>3 CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>91</b>
<b>4 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

Em busca de atender a crescente demanda mundial de alimentos, o setor produtivo agrícola está fundamentado no uso de sistemas de produção intensivos, demandando grandes aplicações de insumos (RONG et al., 2017). Entretanto, as práticas de manejo inadequadas, podem causar a degradação da qualidade do solo, e ameaçar a sustentabilidade do sistema de produção (LIEBIG et al., 2017). O conceito empregado para a qualidade do solo o considera um sistema capaz de funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, permitindo a produtividade de plantas e animais, mantendo ou aumentando a qualidade do ar e da água e promovendo a saúde das plantas e dos animais. O funcionamento das propriedades químicas, físicas e biológicas de forma integrada proporciona o solo a exercer suas funções na natureza (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Em relação a qualidade física do solo, esta envolve o conhecimento de propriedades e processos relativos para que o solo mantenha efetivamente as condições essenciais para saúde do ecossistema (STEFANOSKI et al., 2013). Visto que essas propriedades e processos do solo inferem na sua capacidade de suportar o crescimento das raízes, armazenar e disponibilizar água e nutrientes, promover as trocas gasosas e atividade biológica (ARAÚJO et al., 2012).

Para a identificação da qualidade física do solo é necessário indicar um ou mais indicadores que sejam capazes de monitorar as mudanças que ocorrem nos processos e nas propriedades do solo, assim como na sustentabilidade e na qualidade ambiental em relação ao uso da terra e às práticas de manejo agrícola que integram os diferentes sistemas de produção (BÜNEMANN et al., 2018).

Dentre os sistemas de produção, existe os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs), os quais proporcionam a intensificação da produção e diversos benefícios ao meio ambiente, dentre eles o aumento da qualidade física do solo (ALVARENGA et al., 2010). Neste sentido, os SIPAs têm atraído muitos produtores rurais pelo país, devido aos problemas que são gerados pelo manejo inadequado das lavouras. Os principais problemas encontrados nessas áreas são a compactação e erosão do solo, redução do teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, queda da produtividade das culturas implantadas (TREVISAN et al., 2017; FREDDI et al, 2017; TAVANTI et al., 2019).



Nesta perspectiva, vários estudos demonstraram que a qualidade física do solo é superior nas áreas com sistemas integrados quando comparadas às áreas com sistemas simples (ASSIS et al., 2015; LOSS et al., 2012). Devido a integração dos diferentes componentes, os SIPAs favorecem diversos benefícios, desde a diversidade ecológica até a intensificação do uso da área. Magalhães et al. (2018) observaram que os SIPAs com eucalipto apresentaram menor degradação física do solo após quatro anos de implantação em relação aos sistemas simples. Entretanto, quando os sistemas integrados são manejados inadequadamente, estes podem apresentar compactação do solo, possivelmente causada pelo pisoteio animal e o tráfego de máquinas sob condições desfavoráveis em relação ao conteúdo de água no solo e intensidade de pastejo (HANZA; ANDERSON, 2005; MORAES et al., 2014; FLÁVIO NETO et al., 2015).

Os SIPAs proporcionam incremento de matéria orgânica a partir dos diferentes componentes em variação temporal e espacial, alterando a dinâmica do C do solo e, conseqüentemente, a agregação do solo (SARTO et al., 2020). A matéria orgânica, fonte de carbono orgânico, age nas propriedades físicas do solo de forma direta como agente de formação e estabilização dos agregados, aumentando a qualidade estrutural do solo (WENDLING et al., 2005). Ademais, o conteúdo de matéria orgânica é resultante das condições climáticas do local, atividade biológica e manejo do solo e, por isso possui ampla correlação com parâmetros físicos do solo como estabilidade de agregados e resistência do solo à penetração (JOHANNES et al., 2017; SARTO et al., 2020; BIELUCZYK et al., 2020).

Além da degradação física do solo causada pelo manejo inadequado das lavouras, a intensa utilização de pesticidas para o controle de pragas, patógenos, plantas invasoras etc., acarreta o desequilíbrio do ecossistema e a contaminação do meio ambiente (CARVALHO et al., 2017). Diante disso, a redução de pesticidas e a produção agrícola livre de pesticidas, aliada ao manejo agroecológico garantem menores riscos ambientais e à saúde humana (PIGNATI et al., 2017). Estudos que avaliaram áreas de SIPAs convencionais, ou seja, com uso de pesticidas, demonstraram efeitos benéficos aos atributos físicos do solo (BIELUCZYK et al., 2020; BORGES et al., 2019; FIDALSKI et al., 2015; LOSS et al., 2014; MOREIRA et al. 2012). Entretanto existe carência de trabalhos voltados para avaliação da qualidade física do solo em SIPAs livres de pesticidas agrícolas.

Assim, considerando que (1) os SIPAs, livres de pesticidas, podem favorecer maior adição de matéria orgânica do solo; (2) bem como proporcionar aumento da qualidade física do solo em relação aos sistemas simples; a tese teve como objetivo geral analisar os efeitos dos SIPAs no acúmulo de matéria orgânica e na qualidade física do solo em relação aos sistemas simples.

O Capítulo I avaliou a influência dos SIPAs no incremento de matéria orgânica e sua relação com os atributos físicos do solo nos sistemas de produção agropecuária. Enquanto o Capítulo II determinou os indicadores de qualidade física do solo, analisando a influência dos sistemas integrados sobre a qualidade física do solo em relação aos sistemas de cultivo simples. Também verificou se o índice de qualidade física do solo foi capaz de demonstrar os efeitos dos sistemas de produção agropecuária nas funções físicas do solo.

## **CAPÍTULO I: ACÚMULO DE MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LIVRES DE PESTICIDAS SOB PLANTIO DIRETO**

### **1.1 RESUMO**

A matéria orgânica, fonte de carbono orgânico do solo, é um parâmetro avaliativo da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, visto que proporciona benefícios às propriedades físicas do solo. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o incremento de carbono orgânico e a qualidade estrutural do solo em sistemas de produção agropecuária. O experimento foi realizado no Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária – NITA, localizada na Estação Experimental do Canguiri, pertencente à Universidade Federal do Paraná, no município de Pinhais-PR. Foram coletadas amostras de solo em três camadas (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) de cinco sistemas (Lavoura - L, Pecuária - P, Eucalipto - E, Pecuária-Floresta - PF e Lavoura-Pecuária-Floresta – LPF) no delineamento em blocos ao acaso. A amostragem foi realizada em dois transectos de 25 m cada, coletando-se cinco amostras por transecto, totalizando 10 amostras por camada. Foram determinados os seguintes atributos do solo: carbono orgânico do solo (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COam), estoques totais de carbono (ETC), avaliação visual da estrutura do solo (VESS), resistência tênsil dos agregados (RT), friabilidade do solo (F), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA). Não houve diferença significativa nos teores de COT, COP e COam entre os sistemas na camada de 0-0,05 m. Poucas diferenças foram encontradas entre os tratamentos, pois os sistemas avaliados possuem alta adição de resíduos vegetais no solo, fato observado nos valores de ETC. Para o VESS, a L apresentou a menor nota (1,43), enquanto as maiores notas foram nos sistemas E, LPF e PF (2,49, 2,30 e 2,39), respectivamente. Entretanto, todos os valores estão abaixo da nota considerada prejudicial ao desenvolvimento radicular das plantas (notas > 3). A L, juntamente com a E, PF e LPF, apresentaram os maiores valores de RT na camada de 0-0,05 m. O IEA não apresentou variação entre os sistemas e as camadas avaliadas, demonstrando menor sensibilidade às alterações proporcionadas pelos sistemas. Os sistemas de produção agropecuária promoveram incremento nos estoques totais de carbono após seis anos de implantação, bem como proporcionaram melhoria na qualidade estrutural do solo. Além disso, as estratégias conservacionistas utilizadas no experimento favoreceram ao sistema L o maior acúmulo de carbono orgânico e a melhor qualidade estrutural do solo.

Palavras-chave: Estabilidade de agregados; Matéria orgânica; Degradação do solo; Sustentabilidade.

## 1.2 ABSTRACT

Organic matter, a source of soil organic carbon, is an evaluative parameter of the sustainability of agricultural systems since it offers benefits to the various soil physical properties. Thus, the objective of this work was to evaluate the influence of agricultural production systems on order to increase of organic carbon and on the structural quality of the soil. The experiment was carried out at the Center for Technological Innovation in Agriculture - CTIA, located at the Experimental Station of Canguiri, at Federal University of Paraná, in Pinhais-PR city. Soil samples were collected in three layers (0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m) in five systems (Crop - C, Livestock - L, Eucaliptus - E, Livestock - Forest - LF and Integrated Crop-Livestock-Forest - ICLF) in a randomized block design. Sampling was carried out in the two transects of 25 m each, collecting five samples per transects in a total of 10 samples per layer. Were determined the following soil physical attributes: total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC), organic carbon associated with minerals (OCam), total carbon stocks (TCS), visual evaluation of soil structure (VESS), tensile strength of aggregates (TS), soil friability (F), weighted average diameter (WAD), geometric mean diameter (GMD) and the aggregate stability index (ASI). There was no significant difference in the levels of TOC, POC and OCam between the systems in the 0-0.05 m layer. Fewer differences were found among the treatments, once the evaluated systems have a high addition of vegetal residues in the soil, a fact observed in the values of TCS. For the VESS, C had the lowest score (1.43), while the highest scores were in the E, CLF and LF systems (2.49, 2.30 and 2.39), respectively. However, all values are below the grade considered harmful to plant root development (grades > 3). C, together with E, LF and CLF, presented the highest TS values in the 0-0.05 m layer. The ASI did not show variation between the systems and layers evaluated, showing less sensitivity to changes caused by the systems. Agricultural production systems promoted an increase in total carbon stocks after six years of implementation, as well as providing an improvement in the structural quality of the soil. Furthermore, the conservation strategies used in the experiment favored the C system with the greatest accumulation of organic carbon and the best structural quality of the soil.

Keywords: Aggregate stability; Organic matter; Soil degradation; Sustainability.

### 1.3 INTRODUÇÃO

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) surgem como uma opção viável para uma intensificação sustentável, devido a diversificação do agroecossistema tornando o solo produtivo e resiliente (ROBERTSON et al., 2014). Segundo Moraes et al. (2014) os SIPAs são caracterizados pela integração de dois ou mais componentes (lavoura, pecuária e floresta) numa mesma área em diferentes escalas espaço-temporais, sob um conjunto de práticas planejadas a fim de utilizar os efeitos sinérgicos dos compartimentos solo-plantas-animal-atmosfera.

Além da intensificação da área e ganho na produtividade dos componentes implantados (BELL et al., 2014), os SIPAs proporcionam diversos benefícios ao solo, dentre eles: o aumento da fertilidade através da ciclagem de nutrientes (NIE et al., 2016), estabilidade dos agregados (VIAUD et al., 2018) e aumento do acúmulo de carbono orgânico do solo (COSTA et al., 2015). Nos SIPAs geralmente são utilizadas outras práticas conservacionistas como o plantio direto, o qual envolve o não revolvimento do solo, rotação de culturas e a manutenção da cobertura do solo (FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2014), como também a possibilidade de redução do uso de pesticidas agrícolas, devido aos efeitos da supressão das culturas implantadas (LAMICHHANE et al., 2015).

O não uso de pesticidas agrícolas pode ser uma estratégia segura para a conservação do meio ambiente e segurança do alimento (GOULART et al., 2016). Assim, é possível que os SIPAs possam reduzir os impactos ambientais e sustentar os serviços ecossistêmicos, a partir de uma combinação de práticas agrícolas para um determinado agroecossistema (LEMAIRE et al., 2014).

Diversos estudos utilizaram os estoques de carbono orgânico do solo como um parâmetro avaliativo da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (LANGE et al., 2015; VIZIOLI et al., 2019; BIELUCZYK et al., 2020; MAYER et al., 2020). O aumento dos teores de carbono orgânico do solo favorece a sua qualidade estrutural, proporcionando aeração, permeabilidade, capacidade de retenção de água e fornecimento de nutrientes para as plantas, além da prevenção do efeito estufa (LIAO et al., 2015).

Uma forma de caracterizar os teores de carbono orgânico e prever a sua dinâmica no solo é através do fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica (LAVALLEE et al. 2020; ONTL et al., 2015). A fração carbono orgânico particulado

(COP) é composta por resíduos vegetais frescos e em decomposição maiores que 0,053 mm (SAMSON et al., 2020). Geralmente as camadas superficiais do solo apresentam altas concentrações de COP, principalmente em sistema plantio direto, devido ao acúmulo e preservação física do material orgânico dentro dos macroagregados (MUJDECI et al., 2017).

O COP pode ser facilmente alterado pelas práticas de manejo e por essa razão a avaliação dos teores dessa fração de COS pode ser adotada como um indicador chave tanto para o entendimento da dinâmica do C do solo quanto para a avaliação das práticas agrícolas adotadas (PLAZA-BONILLA et al., 2014; DURIGAN et al., 2017). Já o carbono orgânico associado aos minerais (COam) é caracterizado por partículas finas de matéria orgânica (menores que 0,053 mm) associada aos minerais e mais estáveis, ou seja, sua formação e decomposição ocorre de forma lenta, não sendo sensível às mudanças de manejo (BIELUCZYK et al., 2017), tornando-se constituinte a médio e longo prazo no teor de carbono, associado aos microagregados (BATISTA et al., 2013; OSEI et al., 2018; JAT et al., 2019).

Além do carbono orgânico do solo, também são utilizados outros parâmetros para avaliação da qualidade estrutural do solo, tais como resistência tênsil e friabilidade do solo (TORMENA et al., 2017; CAGNA et al., 2019; HAMILTON et al., 2019); Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados (BLANCO-CANQUI e RUIS, 2018; JAT et al. 2019; VALANI et al., 2020). A avaliação visual da estrutura do solo (VESS) é um método de campo que fornece de maneira rápida a condição estrutural do solo e possui correlação com outros indicadores físicos do solo determinados em laboratório (GUIMARÃES et al., 2017; AULER et al., 2017; CHERUBIN et al., 2017).

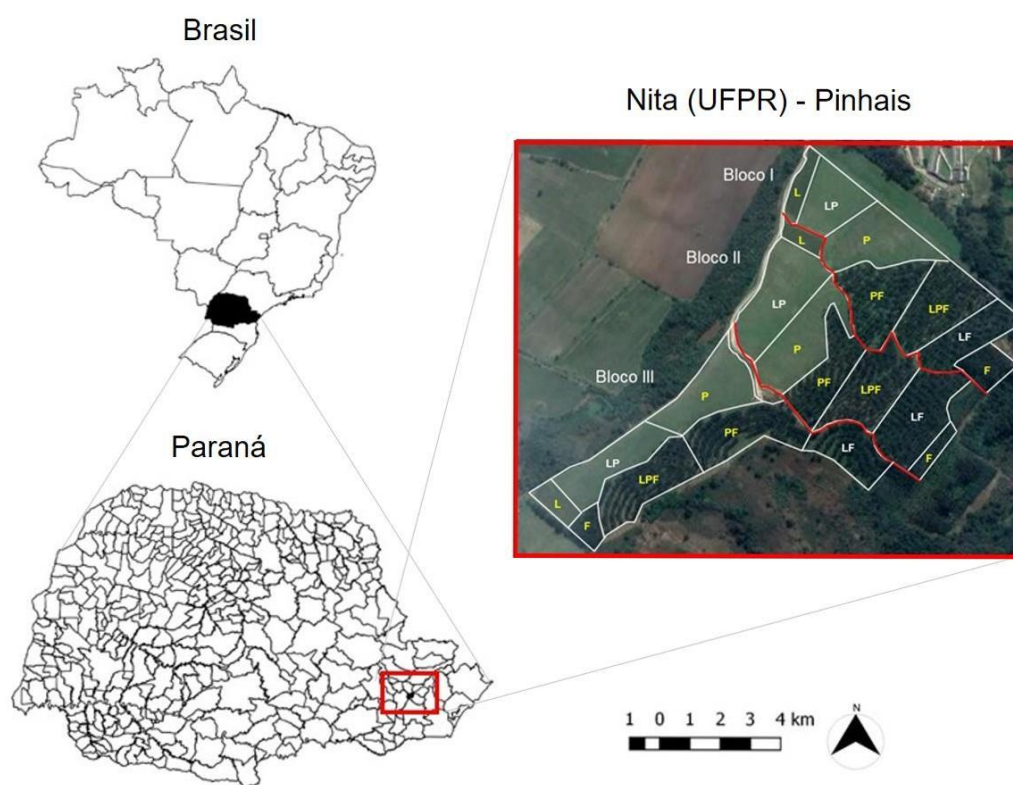
Diante desta perspectiva, torna-se necessário um aprofundamento sobre os efeitos da matéria orgânica na qualidade física do solo considerando a combinação de práticas de manejo, plantio direto e livre de pesticidas, em sistemas integrados de produção agropecuária. A hipótese do estudo foi que os sistemas de produção agropecuária promovem maior incremento de carbono orgânico do solo e, conseqüentemente, aumento da qualidade física do solo sob os sistemas integrados (Pecuária-Floresta e Lavoura-Pecuária-Floresta) em relação aos cultivos simples (Lavoura, Pecuária e Eucalipto). O objetivo deste trabalho foi avaliar o incremento de carbono orgânico e a qualidade física do solo em sistemas de produção agropecuária sob plantio direto e livres de pesticidas.

## 1.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 1.4.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL E EXPERIMENTO

O trabalho foi conduzido na área experimental do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária – NITA, localizada na Estação Experimental do Canguiri, pertencente à Universidade Federal do Paraná, no município de Pinhais-PR (25°24'04"S; 49°07'14"O) (FIGURA 1).

FIGURA 1 - CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL DO NÚCLEO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM AGROPECUÁRIA (NITA), SITUADA NA FAZENDA EXPERIMENTAL DO CANGUIRI DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, PINHAIS-PR. (FONTE: GOOGLE EARTH). L – LAVOURA; P – PECUÁRIA; FLORESTA – F; LF – LAVOURA-FLORESTA; LP – LAVOURA-PECUÁRIA; PF – PECUÁRIA-FLORESTA; LPF - LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA. AS SIGLAS ESCRITAS EM AMARELO SÃO OS SISTEMAS AVALIADOS, DIVIDIDOS EM TRÊS BLOCOS.

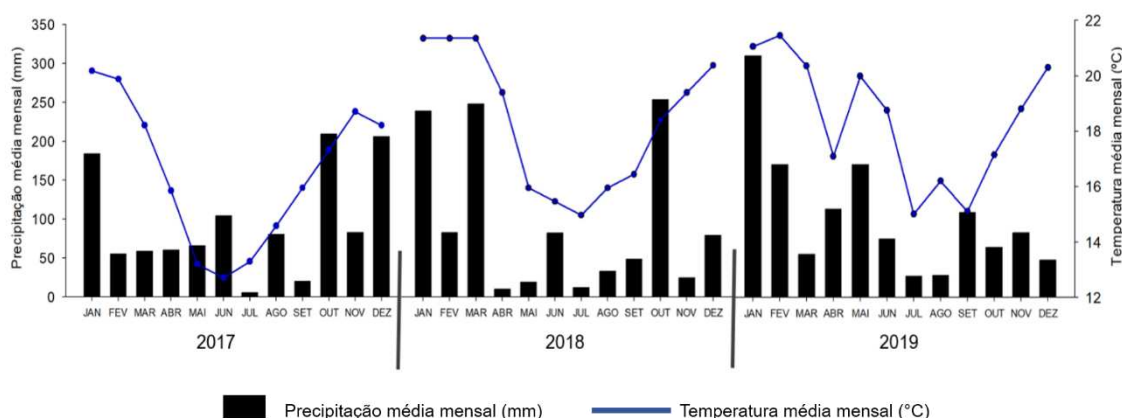


FONTE: O autor (2020).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como temperado úmido (Cfb), com precipitação média anual de 1400 mm, temperatura média de 12,5 °C no mês mais frio e 22,5 °C no mês mais quente, e

ocorrência de geadas frequentes e severas (IAPAR, 2013). Devido a oscilações na distribuição das precipitações nos últimos anos, a Figura 2 apresenta os valores médios de precipitação e temperatura antecedendo um ano para cada amostragem. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico cambissólico de classe textural argilo arenosa (SANTOS et al., 2018). Para a caracterização granulométrica do solo foi realizada a determinação das frações pelo método do densímetro. Assim, a camada de 0-0,05 apresentou 412 g kg<sup>-1</sup> de argila, 79 g kg<sup>-1</sup> de silte e 508 g kg<sup>-1</sup> de areia. Na camada de 0,05-0,10 m apresentou 437 g kg<sup>-1</sup> de argila, 73 g kg<sup>-1</sup> de silte e 488 g kg<sup>-1</sup> de areia. Por fim, na camada de 0,10-0,20 m apresentou 444 g kg<sup>-1</sup> de argila, 71 g kg<sup>-1</sup> de silte e 484 g kg<sup>-1</sup> de areia.

FIGURA 2. DADOS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA MÉDIA MENSAL NOS ANOS DECORRENTES DO EXPERIMENTO (2017, 2018 E 2019).



FONTE: O autor (2020).

\*DADOS COLETADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO DE COLOMBO/PR – IAT (INSTITUTO ÁGUA E TERRA).

Antes da implantação do experimento a área era composta por campos nativos. Foi cultivado milho sob sistema convencional e treinamento de tráfego de máquinas e implementos agrícolas de forma eventual entre 2002 e 2012. Os tratamentos foram instalados a partir de 2012, sob plantio direto e sem uso de pesticidas agrícolas para o manejo das culturas, pois se encontra dentro da Área de Proteção Ambiental Estadual do Iraí. Entretanto, antes da implantação do experimento, o solo foi adubado com lodo tratado pelo processo N VIRO® (8 a 10 ton ha<sup>-1</sup>) aplicado a lanço e depois incorporado ao solo. Em seguida, a aveia preta (*Avena strigosa*) foi semeada na linha, na profundidade de 3 cm, e adubada com 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na linha de semeadura.

A adubação do solo foi realizada a lanço durante a cultura de verão desde a implantação do experimento em toda a área. Assim, a recomendação utilizada para



os sistemas, inclusive o componente florestal, tomou como base a cultura de maior exigência nutricional, no caso o milho (*Zea mays*), em que foi aplicado 180 kg ha<sup>-1</sup> de N (ureia), 45 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (fosfato natural) e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (cloreto de potássio).

QUADRO 1 – CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA.

Sistema	Características
Lavoura	Foi implantado sob plantio direto e em sucessão de culturas, sendo que o milho ( <i>Zea mays</i> ) foi utilizado como cultura de verão e a aveia-preta ( <i>Avena strigosa</i> ) como cobertura vegetal de inverno.
Pecuária	O componente animal foi composto por três animais-testes fixos por parcela e um número variável de animais reguladores com o intuito de manter a carga animal ajustada, conforme a técnica <i>put and take</i> (MOTT; LUCAS, 1952). Para o ajuste da taxa de lotação do sistema, foram realizados semanalmente a medição da altura média do pasto, mantendo 0,24 m no inverno (aveia-preta) e 0,20 m no verão (capim Áries).
Eucalipto	Foi implantado o eucalipto ( <i>Eucalyptus benthamii</i> ) cv. Maiden et Cambage a partir de mudas de origem seminal. Em arranjo espacial de 3 m x 2 m, obtendo uma densidade final de 1.667 árvores ha <sup>-1</sup> .
Pecuária-Floresta	O componente animal também seguiu a técnica <i>put and take</i> (MOTT; LUCAS, 1952), assim como os ajustes da taxa de lotação do sistema. O componente florestal também foi implantado com eucalipto. As mudas foram plantadas em linhas simples acompanhando as curvas de

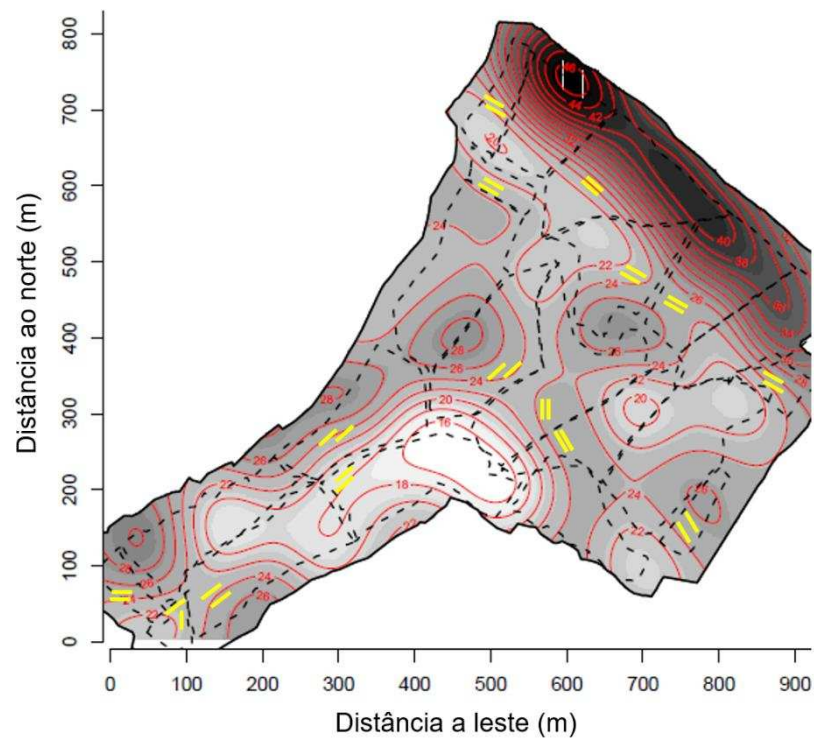
	nível, em espaçamento de 14 m entre linhas e de 2 m nas linhas.
Lavoura-Pecuária-Floresta	O componente animal seguiu a técnica <i>put and take</i> (MOTT; LUCAS, 1952) e o ajuste da taxa de lotação foi realizado a partir da altura média do pasto, sendo 0,24 m no inverno (aveia-preta) e 0,20 m no verão (capim Áries). O componente lavoura foi realizado no intervalo de três anos com a cultura do milho no verão, com o intuito de reduzir a infestação de plantas daninhas. O espaçamento utilizado entre as plantas de milho foi de 0,45 m x 0,25 m, sendo que a primeira linha da lavoura foi 1 m de distância da linha do eucalipto. O eucalipto foi implantado em linhas simples acompanhando as curvas de nível, em espaçamento de 14 m entre linhas e de 2 m nas linhas.

FONTE: O autor (2020).

#### 1.4.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES DE SOLO

A amostragem do solo foi realizada em maio de 2019, após a colheita da cultura do milho, em dois transectos de 25 metros com 5 pontos amostrais a 5 m equidistantes, totalizando 10 pontos amostrais, nos sistemas Lavoura (L), Pecuária (P), Eucalipto (E), Pecuária-Floresta (PF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF). A posição dos transectos nos tratamentos foi determinado a partir da concentração de C no solo ( $24 \text{ g dm}^{-3}$ ) conforme o mapeamento (FIGURA 3).

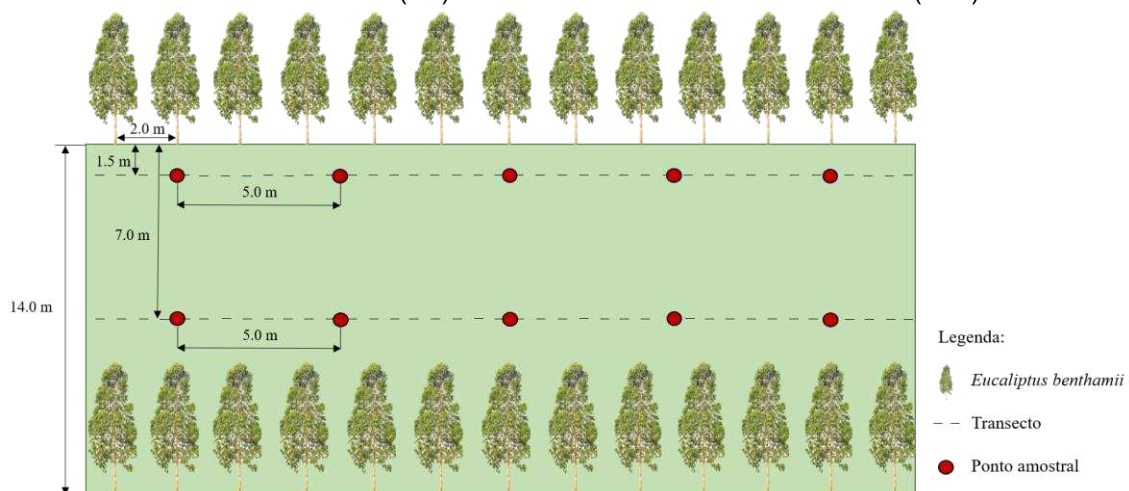
FIGURA 3 – MAPA DE CONCENTRAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO ( $\text{G DM}^{-3}$ ) E A POSIÇÃO DOS TRANSECTOS NO EXPERIMENTO NA COR AMARELA



Fonte: Deiss (Dados não publicados).

Nos tratamentos PF e LPF os transectos foram dispostos próximo a linha de eucalipto e o outro na entrelinha das árvores (FIGURA 4). Desta forma, foram avaliadas amostras de solo de três camadas (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) em cinco tratamentos no delineamento em blocos ao acaso.

FIGURA 4 - POSIÇÕES DE AMOSTRAGEM DE SOLO NOS SISTEMAS INTEGRADOS PECUÁRIA-FLORESTA (PF) E LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF).



FONTE: O autor (2020).

Para a determinação da resistência tênsil dos agregados, as amostras de solo foram coletadas em mini trincheiras com dimensões 0,20x0,20x0,25 m (largura, comprimento e altura, respectivamente), seguindo a orientação dos transectos. Com o auxílio da pá reta, foi coletada uma fatia de solo e destorroada manualmente, os agregados foram obtidos via peneiramento, em que foram utilizados os agregados retidos entre as peneiras de malha de 12,5 e 19 mm, de acordo com a metodologia adaptada de Imhoff et al. (2002). Estes agregados foram secos em estufa a 40 °C durante 24 h com o intuito de homogeneizar a umidade dos agregados. A medida da resistência tênsil dos agregados foi realizada com o auxílio de um atuador eletrônico linear (Marca Tecnal, modelo TE-096) com uma célula de carga de 50 kgf e haste com velocidade constante de 0,03 mm s<sup>-1</sup>. Para cada amostra avaliada foram utilizados dez agregados. A partir do registro das forças necessárias para fraturar cada agregado, foi realizado o cálculo de RT, conforme Dexter; Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 \cdot \left( \frac{P}{D^2} \right) \quad (1)$$

sendo que 0,576 é o coeficiente de proporcionalidade; P é a força aplicada (N); e D é o diâmetro efetivo (mm).

Sendo que o diâmetro efetivo (D) foi calculado conforme Watts; Dexter (1998):

$$D = D_m \cdot \left( \frac{M}{M_m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

em que D<sub>m</sub> é o diâmetro médio do agregado (mm), igual à média dos tamanhos das peneiras utilizadas para obter os agregados; M é a massa do agregado individual (g); M<sub>m</sub> é a massa média dos agregados na população (g).

A friabilidade do solo foi determinada através da estimativa proposta pelo método do coeficiente de variação (WATTS; DEXTER, 1998):

$$F = \frac{\sigma_Y}{Y} \pm \frac{\sigma_Y}{Y\sqrt{2n}} \quad (3)$$

em que  $F$  é a friabilidade do solo;  $\sigma_Y$  é o desvio-padrão dos valores medidos de  $RT$ ;  $Y$  é a média dos valores de  $RT$ ; e  $n$  é o número de repetições. As classes de friabilidade utilizadas foram: não-friável ( $F < 0,10$ ), ligeiramente friável ( $F = 0,10$  a  $0,20$ ), friável ( $F = 0,20$  a  $0,50$ ), muito friável ( $F = 0,50$  a  $0,80$ ) e mecanicamente instável ( $F > 0,80$ ), segundo Imhoff et al. (2002).

Para a determinação da estabilidade de agregados do solo, as amostras foram destorroadas com as mãos e os agregados foram obtidos via peneiramento (malhas de 4 e 2 mm). Foi realizada a distribuição de classes de agregados pelo tamisamento via úmida. Assim, foram utilizadas as peneiras de malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,105 mm para a separação dos agregados. A agitação vertical foi realizada por tamisador acionado por 15 minutos a 30 rotações por minuto (rpm). Na sequência, o solo retido em cada peneira foi levado à estufa para secagem a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 h para determinação da massa seca do solo. Para a estabilidade de agregados foram calculados o diâmetro médio ponderado (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA) de acordo com Castro Filho et al. (1998):

$$\text{DMP} = \sum(x_i \cdot y_i) \quad (4)$$

$$\text{DMG} = \exp \left\{ \frac{\sum w_i \ln x_i}{\sum w_i} \right\} \quad (5)$$

$$\text{IEA (\%)} = \frac{\text{Peso agregados secos} - w_{25} - \text{areia}}{\text{Peso agregados secos} - \text{areia}} \quad (6)$$

em que  $x_i$  é o tamanho médio das classes de agregados (mm);  $y_i$  é a proporção de cada uma das classes de tamanhos de agregados (g) em relação a amostra total;  $w_i$  é o peso dos agregados de cada classe (g);  $w_{25}$  é o peso dos agregados da classe menor que 0,25 mm; areia é o teor de areia da análise granulométrica da caracterização da área.

Com as amostras de solo deformadas foi realizada a determinação do carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico

associado aos minerais (COam) nas camadas de 0-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m. As amostras foram secas em estufa de circulação de ar forçada a 60 °C por 24 h e, posteriormente, peneiradas em malha de 2 mm de abertura. Foi realizado o fracionamento físico granulométrico do carbono orgânico do solo de acordo com Cambardella; Elliot (1992). Foi utilizado 20 g de solo seco e 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>, a 5 g L<sup>-1</sup>, para agitação horizontal por 16 h. Após agitação, a suspensão foi peneirada em malha de 0,05 mm de abertura e o material retido nessa malha foi considerado como o COP após análise.

Posteriormente, esse material foi seco em estufa a 45 °C por 48 h e moído em grau de ágata. O COT foi determinado a partir da trituração de 20 g de solo seco em grau de ágata. A determinação do COT e COP foi realizada pela combustão seca em analisador marca Elemental®, modelo Vario El III. Todas as amostras foram acondicionadas e seladas em cápsulas de estanho e inseridas no analisador, onde foram incineradas a 950 °C por 5 min. Após a combustão, o aparelho forneceu automaticamente a quantidade de C elementar existente na amostra. A determinação do COam foi obtida pela diferença entre os valores de COT e COP.

Para a determinação dos estoques totais de carbono (ETC) foram calculados para cada camada amostra (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) a partir da equação 7:

$$ETC \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = \Sigma (COT \cdot \rho_s \cdot e) \quad (7)$$

Em que ETC é o estoque total de carbono na camada, COT é o carbono orgânico total (%),  $\rho_s$  é a densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>) e  $e$  é a espessura da camada amostrada (cm).

A comparação do estoque total de carbono para massa foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Ellert e Bettany (1995) e descrita por Sisti et al. (2004). Assim, para o cálculo de estoque, a massa de cada sistema se deu a partir da soma de suas respectivas camadas (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m). Enquanto a massa de referência foi equivalente aquela determinada no início do experimento (2012) e definida no mapa de concentração de carbono para a disposição dos transectos (24 g dm<sup>-3</sup>), na camada de 0-0,20 m, sob a  $\rho_s$  média da área (1,2 Mg m<sup>-3</sup>).

A Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) seguiu a metodologia proposta por Guimarães et al., (2011), manuseando e comparando os aspectos dos agregados

de solo. Resumidamente, foi realizada a abertura de mini trincheiras com dimensões 0,20x0,20x0,25 m (largura, comprimento e altura, respectivamente), seguindo a orientação dos transectos. Com o auxílio da pá reta, foi coletada uma fatia de solo e os agregados foram avaliados de acordo com suas características, presença de camadas de agregação contrastantes, distribuição radicular e indícios de atividade biológica, atribuindo-lhes notas variando de 1 (Friável) a 5 (Muito compactado). A nota final foi obtida a partir de uma média ponderada, considerando as notas das camadas de solo de acordo com o gráfico de interpretação visual proposto por Guimarães et al. (2011).

#### 1.4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foi utilizado esquema de parcela subdividida com três repetições, sendo que as camadas foram consideradas como tratamentos. A normalidade dos dados de DMP, DMG, IEA, RT, F, COT, COP, COam, ETC e VESS foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk, quando anormais, foram transformados por Box-Cox e, posteriormente, submetidos à análise de variância. Quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ). Também foram feitas análises dos componentes principais dos sistemas e dos parâmetros estruturais do solo. As análises foram realizadas com o auxílio do *software* R® (R CORE TEAM, 2015).

#### 1.5 RESULTADOS

Os valores médios de carbono orgânico do solo não apresentaram diferença significativa entre os sistemas de produção agropecuária na camada 0-0,05 m (TABELA 1). Já na camada de 0,05-0,10 m, os sistemas L, PF, e E tiveram maiores teores de COT, diferindo estatisticamente dos sistemas P e LPF. Na camada de 0,10-0,20 m, a P e a PF apresentaram valores médios de COT significativamente maiores que em E, L e LPF.

TABELA 1 - CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT), CARBONO ORGÂNICO PARTICULADO (COP) E CARBONO ORGÂNICO ASSOCIADO AOS MINERAIS (COam) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF) E CAMADAS. LETRAS MAIÚSCULAS DENTRO DE CADA CAMADA COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS

MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ). <sup>ns</sup>NÃO SIGNIFICATIVO.

Camada	Sistema	COT	COP	COam
m			g dm <sup>-3</sup>	
0-0,05	L	47,2Aa*	36,3Aa	8,7 <sup>ns</sup>
	P	45,6Aa	21,2Aa	24,3
	E	45,4Aa	23,3Aa	22,1
	PF	52,9Aa	23,0Aa	29,9
	LPF	46,1Aa	21,1Aa	24,9
0,05-0,10	L	35,9Aab	18,4Ab	17,5
	P	35,1Cb	12,5Bb	22,6
	E	35,8ABb	15,2Bb	22,9
	PF	40,0Ab	13,8Bb	26,1
	LPF	35,7BCb	13,4Bb	22,3
0,10-0,20	L	33,9BCb	15,7Aa	17,5
	P	34,7Ab	9,8Bb	24,9
	E	33,7Cb	9,2Bb	24,6
	PF	36,1ABb	9,6Bb	26,4
	LPF	31,4BCb	9,9Bb	21,5

FONTE: O autor (2020).

Para os resultados de matéria orgânica particulada (MOP), não houve diferença significativa entre os tratamentos na camada de 0-0,05 m. Entretanto, para a camada de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, a L teve, significativamente, o maior valor médio de COP, com relação aos demais sistemas avaliados.

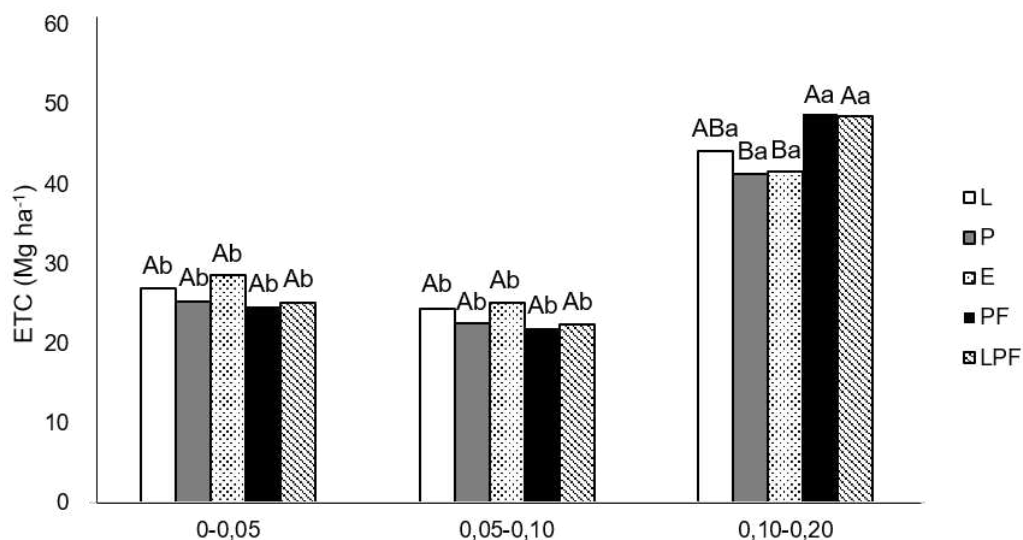
A camada superficial (0-0,05 m) apresentou os maiores valores médios de COP comparado às demais camadas em todos os sistemas avaliados, variando entre 21,1 a 36,3 g dm<sup>-3</sup>. Entretanto, não houve diferença estatística entre as camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, estas variaram entre 12,5 a 18,4 g dm<sup>-3</sup> e 9,2 a 15,7 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente.

Os valores médios de COam, não apresentaram diferença significativa entre os sistemas e camadas avaliados (Tabela 1).

Houve interação significativa entre os valores de estoques totais de carbono nos sistemas de produção agropecuária e camadas avaliadas (FIGURA 5). As camadas 0-0,05 e 0,05-0,10 m não apresentaram diferença estatística entre os sistemas, porém na camada 0,10-0,20 m os sistemas integrados PF (48,88 Mg ha<sup>-1</sup>) e LPF (48,49 Mg ha<sup>-1</sup>), acompanhado da L (44,21 Mg ha<sup>-1</sup>), demonstraram os maiores estoques totais de carbono.



FIGURA 5 – ESTOQUES TOTAIS DE CARBONO DO SOLO (ETC) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA – PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA – LPF) E CAMADAS (M).

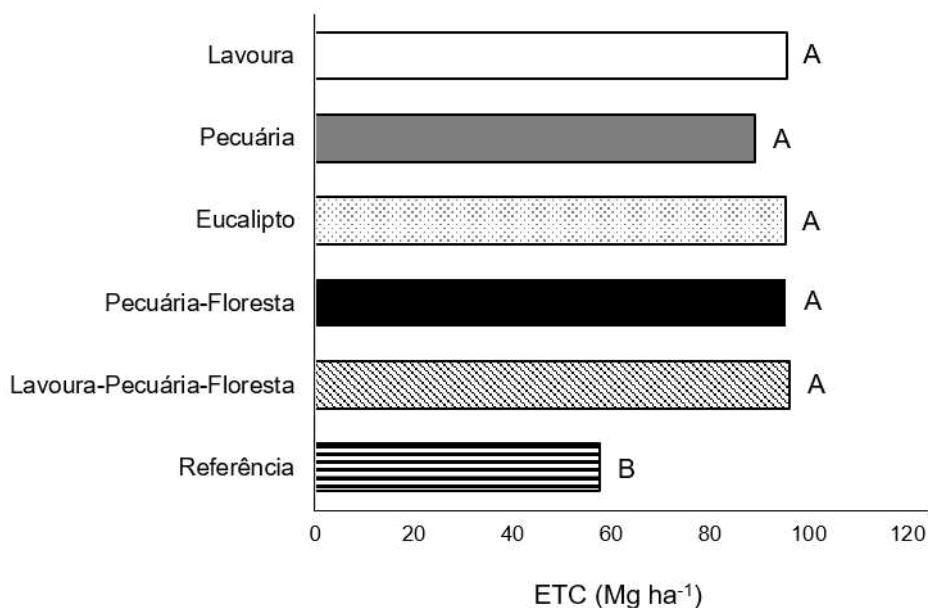


FONTE: O autor (2021).

LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ).

Os valores de estoques totais de carbono dos sistemas de produção agropecuária apresentaram diferença significativa quando comparados com a referência (FIGURA 6). Todos os sistemas avaliados demonstraram incremento de carbono orgânico do solo em relação ao estoque de referência.

FIGURA 6 – COMPARAÇÃO DOS ESTOQUES TOTAIS DE CARBONO DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E REFERÊNCIA, NA CAMADA 0-0,20 M.

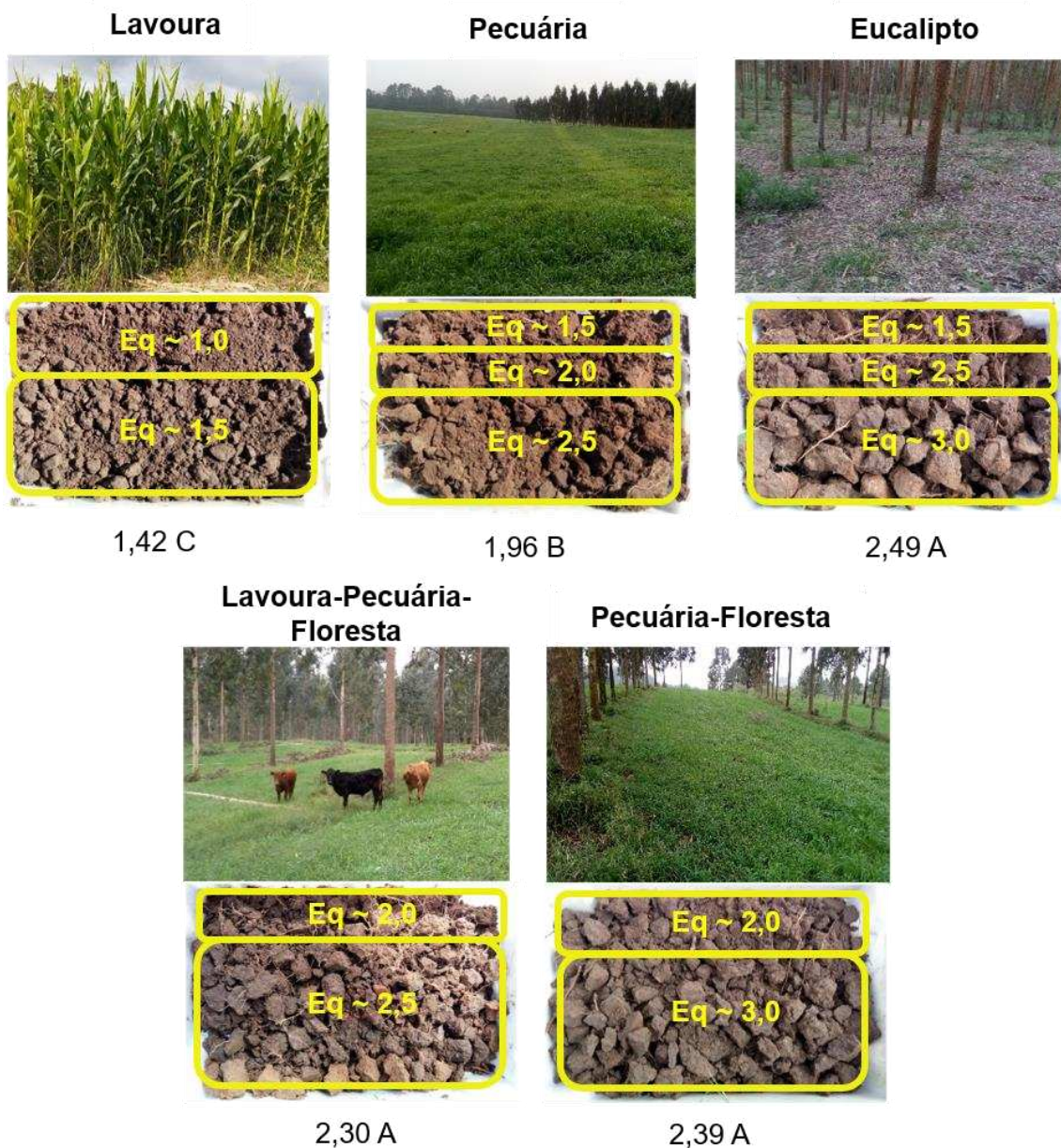


FONTE: O autor (2021).

LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E REFERÊNCIA ( $P < 0,05$ ).

Para a avaliação visual da estrutura do solo (VESS), a L apresentou a menor nota (1,43), enquanto as maiores notas foram nos sistemas E, LPF e PF (2,49, 2,30 e 2,39), respectivamente, e a nota do sistema P foi intermediária (1,96) (FIGURA 5).

FIGURA 7 - NOTAS DE QUALIDADE (EQ) MÉDIOS DA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA. LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA ( $P < 0,05$ ).



FONTE: O autor (2020).

Para os valores de resistência tênsil do solo (RT), na comparação entre os sistemas, a L, juntamente com a E, PF e LPF, apresentaram os maiores valores, diferindo estatisticamente de P na camada de 0-0,05 m (TABELA 2).

Para a friabilidade (F), houve diferença estatística nos valores médios entre os sistemas avaliados (TABELA 2). Houve diferença significativa entre os sistemas somente na camada de 0,10-0,20 m, sendo que a PF, juntamente com L, E e LPF, demonstraram os maiores valores médios, enquanto a P apresentou o menor valor de F. As camadas não apresentaram diferença significativa entre si.

TABELA 2 - RESISTÊNCIA TÊNIL DE AGREGADOS (RT), FRIABILIDADE DO SOLO (F), DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO (DMP), DIÂMETRO MÉDIO GEOMÉTRICO (DMG) E ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE AGREGADOS (IEA) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA – PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA – LPF) E NAS CAMADAS.

Camada m	Sistema	RT kPa	F	DMP mm	DMG %	IEA
0-0,05	L	87,62Aa*	0,58Aa	2,17Aa	1,12Aa	0,95 <sup>ns</sup>
	P	65,08Ba	0,72Aa	1,94Aa	1,10Aa	0,92
	E	78,98ABa	0,62Aa	1,79Aa	1,06Aa	0,92
	PF	65,15ABa	0,72Aa	1,84Aa	1,07Aa	0,94
	LPF	85,88ABa	0,69Aa	1,83Aa	1,07Aa	0,94
0,05-0,10	L	85,51Aa	0,72Aa	1,69Ab	1,03Ab	0,92
	P	82,01Aa	0,65Aa	1,84Aab	1,08Aab	0,93
	E	76,39Aa	0,77Aa	1,77Aa	1,06Aa	0,92
	PF	66,89Aa	0,67Aa	1,85Aa	1,07Aa	0,94
	LPF	84,58Aa	0,68Aa	1,73Aa	1,05Aa	0,93
0,10-0,20	L	89,67Aa	0,72ABa	1,87Ab	1,09Aab	0,94
	P	77,23Aa	0,57Ba	1,60Ab	1,03Ab	0,92
	E	90,74Aa	0,65ABa	1,58Aa	1,02Aa	0,93
	PF	67,40Aa	0,75Aa	1,73Aa	1,05Aa	0,92
	LPF	90,72Aa	0,68ABa	1,70Aa	1,05Aa	0,93

FONTE: O autor (2020).

\*LETRAS MAIÚSCULAS DENTRO DE CADA CAMADA COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ). <sup>NS</sup>NÃO SIGNIFICATIVO.

Para os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) não foram encontradas diferenças estatísticas entre os sistemas (TABELA 2). Na comparação entre camadas para os valores de DMP, foi observado diferença significativa nos sistemas L e P. Na L, o valor de DMP de 0-0,05 m foi superior em relação as demais camadas, enquanto na P, o valor de DMP de 0-0,05 m, juntamente com a 0,05-0,10 m, foram maiores que a de 0,10-0,20 m. Também houve diferença significativa entre as camadas para os valores de DMG nos sistemas L e P. Na L, os valores de DMG foram maiores em 0-0,05 m e 0,10-0,20 m. Na P, o DMG foi maior em 0,10-0,20, juntamente com a 0,10-0,20 m.

O índice de estabilidade de agregados (IEA) não apresentou variação entre os sistemas e as camadas avaliadas (TABELA 2), demonstrando menor sensibilidade às alterações proporcionadas pelos sistemas.

A análise de componentes principais (ACP) explicou 70,44% da variância dos dados contida nos dois primeiros componentes principais (CP), sendo 44,00 % e 26,44 % distribuídos no CP 1 e 2, respectivamente (TABELA 3).

Dentre as variáveis obtidas, DMP, DMG e IEA correlacionaram-se com o CP 1. No entanto, os resultados de COP, COam e VESS definiram o CP 2, ou seja, as variáveis que apresentaram correlação no CP 1 não demonstraram correlação no CP 2.

TABELA 3 – COMPONENTES PRINCIPAIS (PCS), AUTOVALORES, PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA EXPLICADA E PROPORÇÃO ACUMULADA (%) PELOS COMPONENTES, E PROPORÇÃO DA VARIÂNCIA (%) E CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS DENTRO DE CADA COMPONENTE.

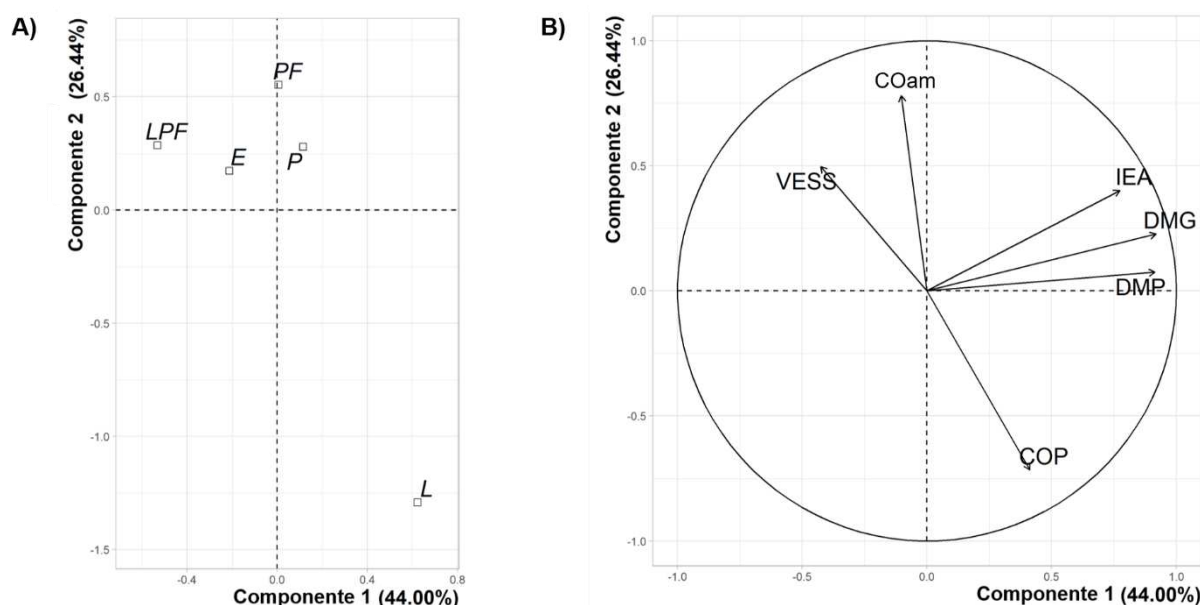
Componente		1		2	
Autovalor		2,64		1,59	
Variância (%)		44,00		26,44	
% Acumulada		44,00		70,44	
Variáveis	Autovetores	Variância para os autovetores	(Correlação)	Autovetores	Variância para os autovetores (Correlação)
COP	0,25	6,45	(0,41)	0,57	32,28 (-0,71)
COam	-0,06	0,40	(-0,11)	-0,62	38,40 (0,78)
DMP	0,56	31,67	(0,91)	-0,06	0,35 (0,09)
DMG	0,56	31,97	(0,92)	-0,18	3,25 (0,23)
IEA	0,47	22,65	(0,77)	-0,32	10,14 (0,40)
VESS	-0,26	6,86	(-0,42)	-0,39	15,58 (0,50)
Total	-	100,00	-	-	100,00 -

FONTE: O autor (2021).

A distinção do sistema Lavoura entre os demais sistemas é reforçada pelo biplot entre os componentes 1 e 2 (FIGURA 8A). Os sistemas LPF e E estão correlacionados e caracterizados na coordenada negativa do eixo 1 do componente 1, enquanto os sistemas PF, P e L estão na coordenada positiva do eixo 1, sendo valores baixos para o sistema L. No componente 2, apenas o sistema L é caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo. Já os demais sistemas demonstraram valores elevados e, conseqüentemente, presentes na coordenada positiva do eixo.

Na FIGURA 8B, estão dispostas as variáveis no biplot entre os componentes 1 e 2. Foi retirado da análise os parâmetros estruturais ETC, RT, F e COT, visto que as variáveis ETC, RT e F, na análise de componentes principais, apresentaram baixa variabilidade, enquanto o COT se mostrou semelhante ao COP.

FIGURA 8 – BIPLLOT COMPONENTE 1 X COMPONENTE 2 SOBRE OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (A) E SOBRE AS VARIÁVEIS (B) PELA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS



FONTE: O autor (2021).

L: LAVOURA; P: PECUÁRIA; E: EUCALIPTO; PF: PECUÁRIA-FLORESTA; LPF: LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA; DMP: DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO; DMG: DIÂMETRO MÉDIO GEOMÉTRICO; IEA: ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE AGREGADOS; COP: CARBONO ORGÂNICO PARTICULADO; COAM: CARBONO ORGÂNICO ASSOCIADO AOS MINERAIS; VESS: AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO.

No componente 1, as variáveis IEA, DMG, DMP e COP estão correlacionados e caracterizados na coordenada positiva do eixo, enquanto o COam e o VESS no eixo negativo. No componente 2, apenas o COP é caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo. É possível observar que as variáveis VESS, COam x COP se correlacionam inversamente, visto que COam x COP já era o esperado, devido a determinação por subtração.

## 1.6 DISCUSSÃO

Os sistemas de produção agropecuária promoveram alterações nos teores das frações físicas do carbono orgânico nas camadas do solo (TABELA 1). Embora a camada de 0-0,05 m não tenha apresentado diferença significativa para os teores de COT, é evidente que os sistemas demonstram eficiência no incremento nos ETC (FIGURA 6).

BALDOTTO et al. (2015) determinaram a quantidade de carbono orgânico do solo na camada de 0-0,20 m em cinco sistemas, sendo eles a mata, integração de

florestas e pecuária (eucaliptos e cutieiras) e monoculturas (agricultura em pivô central e pastagem). Estes autores observaram que a integração do eucalipto com a pastagem (PF) apresentou maior quantidade de carbono orgânico do solo, fato também observado no presente estudo.

De acordo com os resultados de carbono orgânico total, a integração LPF não apresentou o mesmo incremento de carbono em relação ao sistema PF, possivelmente a implantação da lavoura a cada três anos promove a redução do acúmulo do COT a partir da decomposição das raízes das gramíneas forrageiras nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Haja visto que, o pastejo estimula o crescimento radicular das forrageiras (GIACOMINI et al., 2005), principalmente do capim Áries, proporcionando maior adição de resíduos vegetais nestas camadas. O pastejo contribui de forma positiva na adição do COT, a partir da liberação de exsudatos e outras substâncias orgânicas pelas plantas em resposta à constante renovação das raízes (SILVA et al., 2015).

Os sistemas que possuem o componente florestal, além de eucalipto, apresentam maior acúmulo de matéria orgânica devido a produção de serrapilheira (DOLLINGER; JOSE, 2018; NOUMI et al., 2018; OSEI et al., 2018). Mas também, há trabalhos mostrando o inverso, como o de Bieluczyk et al (2020). Neste os autores atribuem a redução em áreas de ILPF em relação a ILP devido ao sombreamento e consequente efeito negativo no crescimento da braquiária consorciada.

Entretanto, nossos resultados não apresentaram diferenças significativas dos sistemas com o componente florestal em relação aos demais, em razão da consequência das práticas agrícolas adotadas na área experimental (TABELA 1). O não uso de herbicidas favoreceu o constante desenvolvimento de diversas plantas, resultando em elevada adição de resíduos e, consequentemente, de COT, enquanto o plantio direto, por não haver revolvimento do solo, reduziu as perdas de COT e assim favoreceu maiores teores na camada superficial (0-0,05 m).

Comparando os valores de COT entre as camadas, a camada superficial (0-0,05 m) apresentou os maiores valores em relação as demais camadas. Na superfície do solo o acúmulo de matéria orgânica ocorre a partir da constante deposição de resíduos vegetais, enquanto em profundidade se deve pelo crescimento das raízes (BALDOTTO; BALDOTTO, 2018). Bieluczyk et al. (2020) avaliaram a quantidade, qualidade e origem da matéria orgânica nos sistemas Lavoura-Pecuária e Lavoura-Pecuária-Floresta e observaram redução dos teores de COT ao longo do perfil. Vale

ressaltar que os teores de COT das camadas e sistemas avaliados foram classificados como muito alto ( $>20,0 \text{ g dm}^{-3}$ ) (PAVINATO et al., 2017). Tal classificação foi utilizada por se tratar de um levantamento dos solos do estado do Paraná e sendo mais próxima da sua realidade. Diante destes altos teores de COT, poucas diferenças foram encontradas entre os tratamentos, pois os sistemas avaliados possuem alta adição de resíduos vegetais no solo. Assim como todos os sistemas de produção agropecuária promoveram incremento nos valores de ETC quando comparado com o valor da referência.

Para os resultados de carbono orgânico particulado (COP), não houve diferença significativa entre os tratamentos na camada de 0-0,05 m (TABELA 1). Visto que a camada superficial (0-0,05 m) se encontra a deposição de material orgânico proveniente dos sistemas avaliados, os quais também não diferiram estatisticamente nos ETCs (FIGURA 5). Assim, a não diferença do COP nesta camada representa incrementos de COT similares para os sistemas. Entretanto, para a camada de 0,05-0,10 m assim como na camada de 0,10-0,20 m, a L demonstrou o maior valor médio de COP, diferindo estatisticamente dos demais sistemas avaliados. Um fator que pode ter contribuído para os maiores valores de COP nestas camadas foi o revolvimento localizado promovido pela abertura do solo, sob plantio direto, para a deposição das sementes e fertilizantes no momento da semeadura da cultura do milho (GUEDES FILHO et al., 2019).

LAVALLEE et al. (2020) afirmaram que o COP tem se mostrado como uma importante ferramenta de prever alterações do carbono orgânico do solo e de avaliar o uso das práticas de manejo na recuperação e/ou degradação do estoque de carbono do solo. Por ser considerado a fração mais lábil da matéria orgânica, o COP apresenta maior sensibilidade ao manejo do solo em um curto prazo (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), além de apresentar a maior taxa de reciclagem dos constituintes orgânicos (ROSSI et al., 2012). A maior labilidade do COP ocorre diante da sua facilidade de decomposição pelos microrganismos do solo (PARDON et al., 2017). Este processo é fundamental para o ciclo do carbono, além da ciclagem de nutrientes para as plantas (BIELUCZIK et al., 2020).

Assim, foi observado que as práticas adotadas na área de estudo favoreceram o acúmulo e manutenção dos teores de COP, principalmente para a L em que a maior produção de biomassa de baixa relação C:N proporcionou maior teor de COP. Maiores teores de COP propiciam um fluxo positivo de carbono no solo, garantindo a



manutenção e o incremento da atividade biológica e da qualidade do solo (SALTON et al., 2005).

O COP representou do total do COT uma variação de 76,9 a 26,6 %, sendo que esta proporção foi decrescente ao longo do perfil do solo, devido à alta deposição de resíduos vegetais na superfície do solo. Segundo BALIN et al. (2017) o COP representa, aproximadamente, 3 a 20 % do COT, sendo constituído principalmente por fragmentos leves de resíduos vegetais que ainda não foram totalmente decompostos. Com isso, assim como o COT, o COP demonstrou maior acúmulo na camada superficial. Isso se deve a deposição de material orgânico pelas plantas aliado ao plantio direto, em que o revolvimento do solo ocorre somente na linha de semeadura, fazendo com que ocorra maior aporte de matéria orgânica na superfície do solo (DIMASSI et al., 2013; FACCIN et al., 2016).

Diversos estudos que avaliaram os teores das frações do carbono do solo, em sistemas integrados de produção agropecuária, observaram maiores teores de COT e COP na camada superficial e o decréscimo ao longo do perfil do solo (BIELUCZYK et al., 2017; SALTON et al., 2011). Entretanto, segundo Balesdent et al. (2018) mais da metade do carbono do solo encontra-se no subsolo (abaixo de 30 cm), enquanto, em média, os primeiros 10 centímetros da camada do solo é responsável pela incorporação recente de carbono. Estes autores ainda relataram que o uso da terra pela agropecuária diminui a incorporação do carbono na superfície, porém sem afetar as camadas mais profundas.

A ausência de diferença significativa dos valores de COam entre as camadas e sistemas corresponde a sua resposta ao manejo do solo ser observada a longo prazo, ao contrário do COP que é mais sensível às mudanças ambientais (LAVALLÉE et al., 2020). Kleber et al. (2015) demonstraram que o tempo do COam ser alterado em um Latossolo da região subtropical sob pastagem é de, aproximadamente, 107 anos, confirmando a ausência de diferença do COam entre os sistemas se deve ao curto período de avaliação.

Enquanto o COP é formado pela fragmentação física, ou seja, pela decomposição parcial dos resíduos vegetais, a formação do COam consiste na decomposição contínua do COP. Porém, neste processo pode ocorrer a oclusão do COP no interior dos agregados, protegendo-o da atividade microbiana devido a essa proteção física (COTRUFO et al., 2015). Haddix et al. (2020) relataram evidências de que o COam pode ser formado a partir da solubilização e transformação de plantas

frescas por microrganismos do solo, de forma independente da decomposição do COP. Entretanto, os autores pontuaram que ainda faltam maiores estudos sobre estes modelos de formação do COam. Além da combinação dos componentes, o conjunto de práticas utilizado na área experimental, que envolve o cultivo sob plantio direto, a técnica de sobressemeadura, e a não utilização de herbicidas no manejo de plantas daninhas, alterou a influência das plantas nos atributos do solo.

Para o VESS, a menor nota da L (FIGURA 7) pode estar relacionada pela cobertura do solo sempre presente ou pela cultura implantada (milho de verão e aveia de inverno) ou pelas plantas espontâneas que surgem com frequência em todas as estações do ano. Geralmente a qualidade estrutural da camada superficial do solo é afetada pelas práticas de manejo adotada na área, tais como pressões externas por pisoteio animal, tráfego de máquinas e acúmulo de matéria orgânica (HUF et al., 2021).

Assim, diferentes arquiteturas e volumes de raízes possivelmente proporcionaram a menor nota do VESS no sistema L, devido a uma série de fatores, dentre eles: maior estabilização do COT (BIELUCZYK et al., 2020), aumento da rede de poros (KRAVCHENKO et al., 2019) aumento e diversificação de microrganismos do solo (OLIVEIRA et al., 2018), formação de bioporos, e na formação e estabilidade dos agregados ao longo do perfil do solo (ANGHINONI, et al., 2019). Aliado a isso, o sistema L apresenta uma redução do tráfego de máquinas em relação as lavouras convencionais, visto que não são realizadas aplicações de herbicidas, fungicidas e inseticidas no manejo da cultura, além que os sistemas pastejados apresentam a influência do pisoteio animal.

Com isso, ocorre menores pressões externas ao solo, reduzindo a sua compactação. Vale ressaltar que a L apresentou maiores teores de COP ao longo do perfil do solo em relação aos demais sistemas avaliados e isso favoreceu, mesmo que em menor intensidade, na redução da nota do VESS. Isso ocorreu devido a maior atuação do COP na formação dos macroagregados, os quais possuem menor força de ligação entre si, criando zonas fraquezas e, conseqüentemente, proporcionando as menores notas do VESS recorrente a essa facilidade de rompimento dos agregados com as mãos (GUIMARÃES et al., 2011).

Já no E e nos sistemas integrados PF e LPF, ocorre menor diversidade de plantas invasoras, devido a menor incidência de luz solar, possibilitando as maiores notas do VESS. Além disso, SARTO et al. (2020) observaram menor atividade

biológica à medida que se aproxima da linha do eucalipto. Esse fato se deve a uma característica do eucalipto, em que a sua serapilheira libera aleloquímicos no solo. Estas substâncias reduzem a decomposição do material orgânico e, conseqüentemente, diminuindo a velocidade de liberação do carbono ao solo.

MARTINS et al. (2013) afirmaram que o pastejo proporciona o aumento de carbono orgânico do solo a partir da frequente decomposição das raízes das gramíneas. Desta forma, o aporte de carbono aliado a agregação do sistema radicular das forrageiras e sem a influência do componente florestal favoreceram a formação dos agregados (POLANÍA-HINCAPIÉ et al., 2021), principalmente dos macroagregados que, conseqüentemente reduziu a nota do VESS nos sistemas com o componente pecuária. Também foi observado a partir deste resultado que a intensidade de pastejo, assim como a altura de pastejo não está sendo prejudicial a qualidade estrutural do solo (AULER et al., 2017).

Mesmo ocorrendo diferença significativa das notas do VESS entre os sistemas, todos os valores estão abaixo da nota considerada prejudicial ao desenvolvimento radicular das plantas (notas superiores a 3) de acordo com GUIMARÃES et al., (2011). Este resultado demonstra que o conjunto de práticas de manejo não estão afetando negativamente a estrutura do solo.

Para os valores de resistência tênsil do solo (RT) (TABELA 2), o menor valor de RT na P provavelmente corresponde pelo consumo contínuo da forragem, o qual estimula o perfilhamento e rebrota da forrageira e, conseqüentemente, maior atividade e crescimento do sistema radicular, segundo Bavoso et al. (2010) em área experimental situado em Castro-PR, em Latossolo Bruno. Como também no aumento da intensidade dos ciclos de secagem e umedecimento do solo, ocasionado pelo consumo e extração de água no período de recuperação da pastagem após o pastejo. Estes autores, afirmaram que esses fatores favorecem a formação de microfissuras ou microfraturas nos agregados, reduzindo os valores de RT.

Outro fator que influencia os valores de RT, é o teor de COT. A matéria orgânica pode ser incorporada em pequenos poros, criando ligações entre as partículas e aumentando a resistência do solo em agregados de tamanhos maiores, fazendo com que esses agregados possuam maior estabilidade e, conseqüentemente, maiores valores de RT (GUIMARÃES et al., 2009). Na camada superficial (0-0,05 m), os teores de COT possivelmente inferiu na RT, visto que o sistema L obteve os maiores valores de COT e RT. Porém, a variação dos teores de COT não foram suficientes para

promover diferenças significativas da RT entre os sistemas nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.

Para a classificação da friabilidade do solo (F), todos os valores encontrados se encontram na classe muito friável (TABELA 2). Estes altos valores de friabilidade obtidos nos sistemas demonstram que os maiores agregados possuem menor resistência à ruptura em relação aos menores (SEBEN JÚNIOR et al., 2016), o que explica a formação de agregados que são facilmente fraturados quando manuseados para a avaliação visual da estrutura do solo, obtendo notas relativamente baixas (inferiores a 3).

Solos que possuem valores elevados de COT, como do presente estudo, apresentam uma hierarquia de estrutura do solo bem desenvolvida, resultando em uma ampla gama de resistência tênsil e, conseqüentemente, um aumento na friabilidade do solo (WATTS; DEXTER, 1998). Segundo GUIMARÃES et al. (2009) fragmentos orgânicos provenientes de resíduos culturais, assim como de serrapilheira e liteira, promovem zonas de fraqueza nos agregados e aumento da porosidade do solo, proporcionando o aumento da friabilidade.

As práticas adotadas no experimento não promoveram diferenças significativas no DMP e DMG entre os sistemas de produção, apenas entre camadas. Sistemas de cultivo que proporcionam maiores valores de DMP refletem em solos com maior resistência contra processos erosivos, pois quanto maior o agregado, maior a porosidade entre os agregados, proporcionando o aumento da infiltração de água e, conseqüentemente, a redução da erosão (ARAÚJO JUNIOR et al., 2011; CASTRO FILHO et al., 1998).

Os sistemas que possuem o componente florestal não apresentaram diferença entre as camadas. Segundo Polanía-Hincapié et al. (2021) a incorporação de árvores em sistemas silvipastoris promovem melhorias nas propriedades físicas do solo, devido as alterações tanto no processo de ciclagem de nutrientes quanto na atividade biológica.

A ausência de diferença estatística para o índice de estabilidade de agregados (IEA) (TABELA 2), possivelmente se deve aos níveis elevados dos teores de COT para todos os sistemas, os quais proporcionaram solos muito friáveis, confirmados pelas baixas notas do VESS, não refletiram em diferenças nos valores de IEA. Segundo Ribon et al. (2014) a COT é o principal parâmetro que influencia na estabilidade de agregados do solo.

Diante dos resultados de ACP (FIGURA 8), devido ao conjunto de dados dos parâmetros estruturais avaliados, o sistema L se mostrou distante dos demais sistemas. Já para os atributos, o VESS demonstrou uma correlação negativa com o COP. Possivelmente se deve a facilidade de ruptura das zonas de fraquezas dos macroagregados. De acordo com a metodologia descrita por Guimarães et al. (2011), para a determinação do VESS é necessário o manuseio e desagregação manual. Este processo ocorre devido as zonas de fraquezas, onde os agregados maiores formam agregados menores após o manuseio e a nota do VESS é dada de acordo com a intensidade de força aplicada.

Assim, dentre outras considerações a serem realizadas, à medida que o rompimento dos agregados exige menor força, menor será a nota atribuída. A fração COP, composta pela matéria orgânica de maior granulometria em relação ao COam, compõe o macroagregado atuando como um agente agregante entre as partículas sólidas do solo, conforme o conceito hierárquico de agregação proposto por Tisdall; Oades, (1982). Diante disso, devido a correlação negativa entre COP e COam, à medida que aumenta teores de COP, reduz a nota do VESS, assim como vice-versa.

## 1.7 CONCLUSÕES

Os sistemas integrados de produção agropecuária, bem como os sistemas simples, promoveram incremento de carbono orgânico do solo após seis anos (início do experimento), contrariando a hipótese do trabalho, e proporcionaram melhoria na qualidade física do solo.

As frações de carbono orgânico do solo e o VESS foram eficientemente sensíveis às mudanças de incremento de carbono e estruturais do solo.

As estratégias conservacionistas utilizadas no experimento favoreceram ao sistema L o maior acúmulo de carbono orgânico e a melhor qualidade estrutural do solo. Porém o conjunto de práticas adotadas, principalmente o não uso de pesticidas, dificulta a sua abrangência em áreas comerciais, ou seja, o produtor rural terá dificuldade de operacionalizar estas mesmas técnicas em áreas mais extensas, havendo a necessidade de adequações. Todavia, pequenas propriedades rurais localizadas ou não em Áreas de Proteção Ambiental, a adoção deste sistema pode ser uma alternativa atrativa e vantajosa para fomentar a proteção ambiental e a produtividade agrícola.

## 1.8 REFERÊNCIAS

- ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCANTARA, E. N. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. **Planta Daninha**, 29, 3, 499-513, 2011.
- AULER, A. C.; GALETTO, S. L.; HENNIPMAN, F. S.; GUNTZEL, E. D.; GIAROLA, N. F.; FONSECA. Soil structural quality degradation by the increase in grazing intensity in integrated crop-livestock system. **Bragantia**. 76, 550-556. 2017.
- BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Relationships between soil quality indicators, redox properties, and bioactivity of humic substances of soils under integrated farming, livestock, and forestry. **Revista Ceres**, 65, 373-380, 2018.
- BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, 62, 301-309, 2015.
- BALDRIAN, P.; KOHOUT, P. Interactions of saprotrophic fungi with tree roots: can we observe the emergence of novel ectomycorrhizal fungi? **New Phytologist**, 215, 511–513, 2017.
- BALESDENT, J.; BASILE-DOELSCH, I.; CHADOEUF, J.; CORNU, S.; DERRIEN, D.; FEKIACOVA, Z.; HATTÉ, C. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth. **Nature**, 559, 7715, 599–602. 2018. doi: 10.1038 / s41586-018-0328-3
- BALIN, N. M.; ZIECH, A. R. D.; OLIVEIRA, J. P. M.; GIRARDELLO, V. C.; STUMPF, L.; CONCEIÇÃO, P. C. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia Agraria**, 18, 85-94, 2017.
- BAVOSO, M. A.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Resiliência física de dois Latossolos vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência Solo**, 36, 1892-1904, 2012.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. de; ROWS, J. R. C. Teores e estoque de carbono em frações lábeis e recalcitrantes do carbono orgânico do solo sob integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 3377-3388, 2013.
- BELL, L. W.; MOORE, A. D.; KIRKEGAARD, J. A. Evolution in crop-livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia. **European Journal Agronomic**. 57, 10–20, 2014.
- BIELUCZYK, W.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; BONETTI, J. D. A.; FREÓ, V. A.; SILVA NETO; E. C. A.; BONETTI, J. Granulometric and oxidizable carbon fractions of soil organic matter in crop-livestock integration systems. **Semina: Ciências Agrárias**, 38, 607–622, 2017.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISID, A.; BERNARDI, A. C.C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; CAMARGO, P. C.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, 371, 2020.

BU, R.; REN, T.; LEI, M.; LIU, B.; LI, X.; CONG, R.; ZHANG, Y.; LU, J. Tillage and straw-returning practices effect on soil dissolved organic matter, aggregate fraction and bacteria community under rice-rice-rapeseed rotation system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 287, 2020.

CALONEGO, J. C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35, 2183-2190, 2011.

CAMBARDELLA, S. V.; ELLIOTT, E. T. Particule soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Mandison, 56, 777-783, 1992.

CASTRO FILHO, C., LOURENÇO, A., DE F. GUIMARÃES, M. e FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**. v.65, n.1, p.45-51. 2002.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; ULIAN, N. A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Acúmulo de nutrientes e tempo de decomposição da palhada de espécies forrageiras em função de épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, Uberlândia, 31, 3, 818-829, 2015.

COTRUFO, M.F., SOONG, J.L., HORTON, A.J., CAMPBELL, E.E., HADDIX, M.L., WALL, D.H., PARTON, W.J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**. 8, 776–779. 2015.

DEXTER, A. R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Agriculture Engineer. Res.**, 31:139-147, 1985.

DEXTER, A. R. & WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. eds. **Soil and environmental analysis: Physical methods**. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 2000. p.401-430.

DIMASSI, B.; COHAN, J. P.; LABREUCHE, J.; MARY, B. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 169, 12-20, 2013.

DOLLINGER, J.; JOSE, S. Agroforestry for soil health. **Agroforest System**, 92, 213-219, 2018.

DURIGAN, M.R., CHERUBIN, M.R., CAMARGO, P.B., FERREIRA, J.N., BERENGUER, E., GARDNER, T.A., BARLOW, J., DIAS, C.T. DOS S., SIGNOR, D., OLIVEIRA JUNIOR, R.C. DE, CERRI, C.E.P. Soil organic matter responses to

anthropogenic forest disturbance and land use change in the Eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, 9, 379. 2017.

DUVAL, M. E.; MARTINEZ, J. M.; GALANTINI, J. A. Assessing soil quality indices based on soil organic carbon fractions in different long-term wheat systems under semiarid conditions. **Soil Use and Management**, 00, 1-12, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 353 p.

FACCIN, F. C.; MARCHETTI, M. E.; SERRA, A. P.; ENSINAS, S. C. Frações granulométricas do carbono orgânico do solo em consórcio de milho safrinha com capim-marandu sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 51, 2000-2009. 2016.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. **European Journal Agronomic**. 57, 62–70. 2014.

HADDIX, M. L.; GREGORICH, E. G.; HELGASON, B. L.; JANZEN, H.; ELLERT, B. H.; COTRUFO, F. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. **Geoderma**, 363, 2020.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P. S. Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. **Advances in Agronomy**, 130, 2015.

KRAVCHENKO, A.N., GUBER, A.K., RAZAVI, B.S., KOESTEL, J., QUIGLEY, M.Y., ROBERTSON, G.P., KUZIAKOV, Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. **Nature Community**. 10, 3121. 2019.

LAI, R. L. D. L. Weed dynamics in integrated crop-livestock systems in subtropical, 2020, 91 p. **Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

LIMA, R. L. D. Adensamento populacional da cultura do girassol como estratégia de controle de plantas invasoras em um sistema integrado de produção agropecuária. 2016, 88 p. **Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

GIACOMINI, Q. Q.; MATTOS, W. T.; MATTOS, H. B.; WERNER, J. C.; CUNHA, E. A.; CARVALHO, D. D. Crescimento de Raízes dos Capins Aruana e Tanzânia Submetidos a Duas Doses de Nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 34, 4, 1109-1120, 2005.

GOULART, F. F.; CARVALHO-RIBEIRO, S.; SOARES-FILHO, B. Farming-Biodiversity Segregation or Integration? Revisiting Land Sparing versus Land Sharing Debate. **Journal of Environmental Protection**, 7, 2016.



GUEDES FILHO, O.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; MAZZINI-GUEDES, R. B. Boundary line approach applied among crop emergence parameters and soil physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 23, 6, 454-459, 2019.

GUEDES FILHO, O.; SILVA, A. P.; TORMENA, A. C. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, 204, 94-101, 2013.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, 27, 395-403, 2011.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, É. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agrícola**, v. 66, n. 4, p. 499–505, 2009.

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas climáticas básicas do estado do Paraná**. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná; 2013.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

JAT, H. S.; DATTA, A.; CHOUDHARY, M.; YADAV, A. K.; CHOUDHARY, V.; SHARMA, P. C.; GATHALA, M. K.; JAT, M. L.; MCDONALD, A. Effects of tillage, crop establishment and diversification on soil organic carbon, aggregation, aggregate associated carbon and productivity in cereal systems of semi-arid Northwest India, **Soil and Tillage Research**, 190, 128-138, 2019.

LAMICHHANE, J. R.; DACHBRODT-SAADEH, S.; KUDSK, P. MESSEAN, A. Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. **Plant Disease**, 100, 1. 2015.

LANGE, M.; EISENHauer, N.; SIERRA, C. A.; BESSLER, H.; ENGELS, C.; GRIFFITHS, R. I.; MELLADO-VÁZQUES, P. G.; MALIK, A. A.; ROY, J.; SCHEU, S.; STEINBEISS, S.; THOMSON, B. C.; TRUMBORE, S. E.; GLEIXNER, G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature Communications**, 6, 6707, 2015.

LAVALLEE, J.M., SOONG, J.L., COTRUFO, M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biologic**. 26, 261–273. 2020.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COFRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 00, 1-13, 2019.

LEMAIRE, G., FRANZLUEBBERS, A., CARVALHO, P.C. F., DEDIEU, B. Integrated crop- livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agricola Ecosystem Environing**. 190, 4–8. 2014.

LIAO, Y.; WU, W. L.; MENG, F. Q.; SMITH, P.; LAL, R. Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in northern China. **Biogeosciences**, 12, 1403–1413, 2015.

LIEBIG, M. A.; HERRICK, J. E.; ARCHER, D. W.; DOBROWOLSKI, J.; DUIKER, S. W.; FRANZLUEBBERS, A. J.; HENDRICKSON, J. R.; MITCHELL, R.; MOHAMED, A. J. RUSSELL, T. C. Strickland Aligning Land Use with Land Potential: The Role of Integrated Agriculture. **Agricultural & Environmental Letters**, 2017.

MAYER, M.; PRESCOTT, C. E.; ABAKER, W. E. A.; AUGUSTO, L.; CECILLON, L.; FERREIRA, G. W. D.; JAMES, J.; JANDL, R.; KATZENSTEINER, K.; LACLAU, J.; LAGANIERE, J.; NOUVELLON, Y.; PARE, D.; STANTURF, J. A.; VANGUELOVA, E. I.; VESTERDAL, L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. **Forest Ecology and Management**, 466, 2020.

MARTINS, D.C.; VILELA, S. D. J.; ALMEIDA, R. G.; ARAUJO, S. A. C.; SILVA, L. D.; PASCHOALOTO, J. R.; MARTINS, P. G. M. A. Animal performance and nutritional characteristics of Piatã-grass in integrated systems. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 72, 3, 1027-1033, 2020.

MARTINEZ, J. M.; GALANTINI, J. A.; DUVAL, A.; LOPEZ, F. M. Soil quality assessment based on soil organic matter pools under long- term tillage systems and following tillage conversion in a semi- humid region. *Soil Use Management*, 00, 1-10, 2020.

MORAES, A., DE CARVALHO, P.C. DE F., ANGHINONI, I., LUSTOSA, S.B.C., COSTA, S.E.V.G. DE A., KUNRATH, T.R. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal Agronomic**. 57, 4–9. 2014.

MOTT, G.O., LUCAS, H.L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. **Proceedings of the International Grassland Congress**, Pennsylvania, State College Press. 6 1380–1395. 1952.

NEARING, M. A.; XIE, Y.; LIU, B.; YE, Y. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, 5, 77–84. 2017.

NIE, Z.; MCLEAN, T.; CLOUGH, A.; TOCKER, J.; CHRISTY, B.; HARRIS, ROB.; RIFFKIN, P.; CLARK, S.; MCCASKILL, M. Benefits, challenges and opportunities of integrated crop-livestock systems and their potential application in the high rainfall zone of southern Australia: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 235, 17–31. 2016.

NOUMI, V. N.; ZAPFACK, L.; HAMADOU, M. R.; DJONGMO, V. A.; WITANOU, N.; NYECK, B.; NGOSSOMO, J. D.; MBOBDA, R. B. T.; MAPONGMETSEM, P. M.

Floristic diversity, carbon storage and ecological services of eucalyptus agrosystems in Cameroon. **Agroforest System**. 92, 239-250, 2018.

OLIVEIRA, J.M., MADARI, B.E., CARVALHO, M.T.D.M., ASSIS, P.C.R., SILVEIRA, A.L.R., DE LELES LIMA, M., WRUCK, F.J., MEDEIROS, J.C., MACHADO, P.L.O.D.A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**. 18, 105–116. 2018.

ONTL, T. A.; CAMBARDELLA, A. A.; SCHULTE, A. A.; KOLKA, R. K. Factors influencing soil aggregation and particulate organic matter responses to bioenergy crops across a topographic gradient. **Geoderma**, 255-256, 2015.

OSEI, A. K.; KIMARO, A. A.; PEAK, D.; GILLESPIE, A. W.; VAN REES, K. C. J. Soil carbon stocks in planted woodlots and Ngitili systems in Shinyanga, Tanzania. **Agroforest System**. 92, 251-262, 2018.

PAVINATO, P. S., PAULETTI, V., MOTTA, A. C. V., MOREIRA, A., (2017). **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR. 482 p.

PLAZA-BONILLA, D., ÁLVARO-FUENTES, J., CANTERO-MARTÍNEZ, C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. **Soil Tillage Research**. 139, 19-22. 2014.

POLANIA-HINCAPIE, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, 386, 2021.

RADNADASS, A.; FERNANDES, P.; AVELINO, J.; HABIB, R. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. **Agronomy Sustainable**. 32, 273–303, 2012.

RIBON, A. A.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FERNANDES, K. L.; HERMÓGENES, V. T. L. Alterações na estabilidade de agregados de latossolo e argissolo em função do manejo, na entrelinha da seringueira (*Hevea brasiliensis*). **Revista Árvore**, 38, 1065-1071, 2014.

ROBERTSON, G. P.; GROSS, K. L.; HAMILTON, S. K.; LANDEIS, D. A.; SCHMIDT, T. M.; SNAPP, S. S.; SWINTON, S. M. Farming for Ecosystem Services: An Ecological Approach to Production Agriculture. **Bioscience**, 64, 5, 2014.

RONG, Q.; CAI, Y.; CHEN, B.; YUE, W.; YIN, X.; TAN, Q. An enhanced export coefficient based optimization model for supporting agricultural nonpoint source pollution mitigation under uncertainty Qiangqiang. **Science of the Total Environmen**. 2017.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações lábeis da matéria orgânica em sistema de cultivo com palha de braquiária e sorgo. **Ciência Agrônômica**. 43, 2012.

SALTON, J. C. Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical. 2005. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALTON, J.C., MIELNICZUK, J., BAYER, C., FABRÍCIO, A.C., MACEDO, M.C.M., BROCH, D.L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 46, 1349–1356. 2011.

SAMSON, M. É.; CHANTIGNY, M. H.; VANASSE, A., MENASSERI-AUBRY, S.; ROYER, I.; ANGERS, D.A. Management practices differently affect particulate and mineral-associated organic matter and their precursors in arable soils, **Soil Biology and Biochemistry**, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107867>.

SARTO, M. V. M.; BORGES, W. L. B.; SARTO, J. R. W.; et al. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, 145, 2020.

SEBEN-JUNIOR, G. F.; CORA, J. E.; LAL, R. Physical quality of an Oxisol under no-tillage subjected to different cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51, 9, 1568-1574, 2016.

SILVA, A. S.; COLOZZI FILHO, A.; NAKATANI, A. S.; ALVES, S. J.; ANDRADE, D. S.; GUIMARÃES, M. F. Microbial characteristics of soils under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 40-48, 2015.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M.; Organic matter and waterstable aggregates in soils. **Journal Soil Science**. v. 33, p.141-163, 1982.

TURNER, B. L.; KODALI, S. Soil system dynamics for learning about complex, feedback-driven agricultural resource problems: model development, evaluation, and sensitivity analysis of biophysical feedbacks. **Ecological Modelling**, 428, 2020.

VIAUD, V.; SANTILLAN-CARVANTES, P.; CORFINI-AKKAL, N, GUILLOU, C. L.; PREVOST-BOURE, N. C.; RANJARD, L.; MENASSERI-AUBRY, S. Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 265, 166–177, 2018.

VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K.M. V.; BARTH, G. Silage yield, organic carbon content and physical attributes of a chiseled Ferralsol under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 14, 3, 2019.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 49, p. 73-84, 1998.

## 2 CAPÍTULO II: QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LIVRE DE PESTICIDAS AGRÍCOLAS SOB PLANTIO DIRETO

### 2.1 RESUMO

Frente a crescente demanda mundial por alimentos aliada a preocupação ambiental, os sistemas integrados de produção agropecuária são considerados opções sustentáveis de produção e que proporcionam diversos benefícios ao meio ambiente. O objetivo do estudo foi avaliar a qualidade física do solo dos sistemas integrados em relação aos sistemas simples e, avaliar a eficiência e sensibilidade do índice de qualidade física do solo para detectar alterações induzidas pelos sistemas de produção agropecuária. O estudo foi realizado na área experimental do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária – NITA, localizada na Estação Experimental do Canguiri, pertencente à Universidade Federal do Paraná, no município de Pinhais-PR. Foram coletadas amostras de solo em três camadas (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) de cinco sistemas (Lavoura - L, Pecuária - P, Eucalipto - E, Pecuária-Floresta - PF e Lavoura-Pecuária-Floresta – LPF) no delineamento em blocos ao acaso. A amostragem foi realizada em dois transectos de 25 m cada, coletando-se cinco amostras por transecto, totalizando 10 amostras por camada. Para determinação do Índice de Qualidade Física do solo (IQFS) foram escolhidos os indicadores para representar quatro funções físicas críticas do solo:  $f(i)$  capacidade do solo de suportar o crescimento radicular (densidade do solo, resistência do solo à penetração e avaliação visual da estrutura do solo);  $f(ii)$  capacidade de armazenamento de água no solo (microporosidade, espaço poroso preenchido com água e capacidade de armazenamento de água no solo);  $f(iii)$  capacidade de aeração (macroporosidade, capacidade de aeração do solo, difusividade relativa do gás) e  $f(iv)$  capacidade de resistir à erosão e à degradação física do solo (condutividade hidráulica saturada, carbono orgânico do solo, índice de estabilidade estrutural). Para a  $f(i)$  os sistemas L e P apresentaram as notas maiores (0,94 e 0,87), respectivamente. Para as  $f(ii)$  e  $f(iii)$  o sistema E demonstrou as maiores notas (0,93 e 0,79), respectivamente, diferindo significativamente dos demais sistemas. Já para a  $f(iv)$  os sistemas E (0,99), LPF (0,99) apresentaram os maiores valores, juntamente com a L (0,94) e P (0,95). Assim, os sistemas E e L forneceram as melhores condições físicas do solo, devido principalmente aos indicadores Mic, CAS e EPPA relacionados a capacidade de armazenamento de água e aos atributos Mac, CAS e  $D_s/D_0$  referentes a capacidade de aeração, proporcionando as maiores notas do IQFS. Conclui-se que os sistemas de produção agropecuária com plantio direto, livres de pesticidas, promoveram mudanças positivas nas propriedades, sendo que os sistemas simples E e L apresentaram as melhores condições físicas do solo, contrariando a hipótese do trabalho. O IQFS foi capaz de demonstrar as alterações nas funções físicas do solo pelos sistemas de produção agropecuária, e ser adotado como um protocolo de avaliação da qualidade física do solo.

Palavras-chave: Sustentabilidade do solo; Compactação; Cultivo simples; Sistemas Integrados de Produção Agropecuária.

## 2.2 ABSTRACT

In view of the growing world demand for food combined with environmental concerns, integrated agricultural production systems are considered sustainable production options and provide several benefits to the environment. The objective of the study was to evaluate the soil physical quality of the integrated systems in relation to simple systems, and to evaluate the efficiency and sensitivity of the soil physical quality index to detect changes induced by agricultural production systems. The study was carried out at the experimental area of the Center for Technological Innovation in Agriculture - CTIA, located at the Experimental Station of Canguiri, at Federal University of Paraná, in the Pinhais-PR city. Soil samples were collected in three layers (0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m) from five systems (Crop - C, Livestock - L, Eucalyptus - E, Livestock-Forest - LF and Integrated Crop-Livestock-Forest - ICLF) in a randomized block design. Sampling was performed in two transects of 25 m each, where were collected five samples per transect, totaling 10 samples per layer. To determine the Soil Physical Quality Index (SPQI), indicators were chosen to represent four critical physical functions of the soil:  $f$  (i) the soil's ability to support root growth (soil density, soil resistance to penetration and visual evaluation soil structure);  $f$  (ii) water storage capacity in the soil (microporosity, soil water storage capacity, water-filled pore space);  $f$  (iii) aeration capacity (macroporosity, soil aeration capacity, relative gas diffusivity) and  $f$  (iv) ability to resist erosion and physical degradation of the soil (saturated hydraulic conductivity, soil organic carbon, structural stability index). For  $f$  (i) the C and L systems presented the highest grades (0.94 and 0.87), respectively. For  $f$  (ii) and (iii) system E showed the highest scores (0.93 0.79), respectively, differing significantly from the other systems. As for  $f$  (iv), systems E (0.99), CLF (0.99) presented the highest values, together with C (0.94) and L (0.95). Thus, the E and C systems provided the best physical soil conditions, mainly due to the Mic, CAS and EPPA indicators related to water storage capacity and the Mac, CAS and  $D_s/D_o$  attributes related to aeration capacity, providing the highest SPQI scores. It is concluded that no-till farming systems, pesticides-free, promoted positive changes in the properties, and the simple systems E and C presented the best physical soil conditions, contrary to the hypothesis of the work. The SPQI was able to demonstrate changes in soil physical functions by agricultural production systems, and be adopted as a protocol for assessing the soil physical quality.

**Keywords:** Soil sustainability; Compaction; Simple cultivation; Integrated Crop-Livestock Systems.

## 2.3 INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, a intensificação agrícola tem permitido o aumento da produção de alimentos para suprir a crescente demanda mundial (POFFENBARGER et al., 2017). Este aumento da produção só foi possível devido a adoção de práticas, dentre elas o uso de pesticidas agrícolas, porém a sua utilização pode acarretar danos ambientais, tais como atingir organismos não-alvo, causar o desequilíbrio do ecossistema, e contaminar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos (LIEBMAN et al., 2016; ROBERTSON et al., 2014). Além disso, o uso de pesticidas pode gerar situações de risco à saúde humana, a partir da exposição e possíveis acidentes, ocasionando intoxicação aguda, subaguda e crônica (PIGNATI et al., 2017).

Diante deste cenário, diferentes estratégias de manejo foram desenvolvidas com o intuito de reduzir e até mesmo não utilizar pesticidas e, garantir a produtividade e a saúde do agroecossistema (HUNT et al., 2017). Estes autores afirmaram que a cobertura do solo, a diversidade de rotação de culturas, a consorciação de culturas, o uso de culturas com maior competitividade e a combinação de práticas mecânicas e culturais, são algumas estratégias integradas de manejo, benéficas no âmbito agrônomo e ambiental. Entretanto, Vasileiadis et al. (2015) relataram que a resistência da adesão dos agricultores por estas alternativas se deve ao aumento da complexidade do sistema de produção. RATNADASS et al. (2012) afirmaram que adotando a abordagem agroecológica, o qual se baseia na conservação ou introdução de diversas espécies vegetais no agroecossistema, pode ser uma alternativa para não utilizar pesticidas. Visto que se torna necessário compreender os mecanismos envolvidos entre os organismos presentes no sistema.

Ademais, o solo é um dos componentes necessários para a produção de alimentos, assim seu uso deve ser racional e sustentável (KEESSTRA et al., 2016). Neste sentido, a degradação do solo contrapõe os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) (ONU, 2020). Além disso, o uso de pesticidas e o 15º ODS, o qual propõe: “Proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerenciar florestas de forma sustentável, combater a desertificação e deter e reverter a degradação da terra e, deter a perda de biodiversidade”, seguem caminhos divergentes.

Segundo Schreinemachers; Tipraqsa (2012) a utilização de pesticidas por hectare em países em desenvolvimento, como o Brasil, aumentou rapidamente. Os autores afirmaram que nestes países a regulamentação do uso de pesticidas são menos exigentes e a produção total de alimentos é priorizado em relação à segurança do alimento e responsabilidade ambiental.

Arelado aos impactos negativos do uso de pesticidas, a degradação do solo também é um problema comum, que provoca a redução dos processos ecossistêmicos e da qualidade do solo (LAL, 2015). Nesta perspectiva, a utilização de sistemas conservacionistas, como o plantio direto, é uma opção viável para a manutenção e aumento da qualidade do solo (ABDOLLAHI; MUNKHOLM, 2017). Além do plantio direto, sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) se destacam como outra alternativa para a conservação do solo (SANTOS et al., 2020).

Conceitualmente, o SIPA é composto por práticas planejadas de produção de culturas e criação de animais em uma mesma área, envolvendo interações sequenciais ou simultâneas entre os componentes presentes neste sistema (MORAES et al., 2014). Estes sistemas propiciam diversos benefícios ao solo, por exemplo, a formação e estabilidade de agregados, o aumento da macroporosidade, da condutividade hidráulica, entre outros (FIDALSKI et al., 2015; LOSS et al., 2014; MOREIRA et al. 2012; SCHLUTER et al., 2020). E combinado com a ausência do revolvimento do solo, promovido pelo plantio direto, há o aumento no incremento da matéria orgânica e na ativação da biologia do solo pelas raízes (BORGES et al. 2019; FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2014; MACEDO et al., 2009).

Entretanto, a melhoria da qualidade física do solo pelos SIPAs depende do manejo dos seus respectivos componentes (MORAES et al., 2016). O manejo inadequado das atividades agropecuárias, sejam elas pelo componente animal com elevada taxa de lotação de pastejo (FIDALSKI et al., 2015); pelo componente florestal com o espaçamento indevido das árvores (BORGES et al., 2019) e/ou escolha da espécie (SARTO et al., 2020); pelo componente lavoura com implantação de cultura inadequada (STEFANOSKI et al., 2014) afetam as propriedades físicas do solo. Pois, o aumento da compactação, da erosão hídrica e eólica e da mineralização do carbono orgânico do solo estão envolvidos na degradação física do solo (OLIVEIRA et al., 2020). Desta forma, podem promover a degradação dos recursos ambientais e, dependendo do grau de perturbação, estas propriedades irão requerer um período de tempo prolongado para se restaurarem (ASSIS et al., 2015).



Tendo em vista que os SIPAs propiciam a diversidade de espécies vegetais a partir da combinação dos componentes, proporcionando melhorias na qualidade física do solo (FIDASKI et al., 2015; SANTOS et al., 2020). E, que a produção agrícola livre de pesticidas dependerá de uma série de medidas como manejo integrado de pragas e doenças, manejo cultural de plantas daninhas através da supressão e/ou efeito alelopático de outras espécies vegetais (LAMICHHANE et al., 2015). Desta forma, a utilização destas medidas associadas aos SIPAs acarretará na redução dos impactos ambientais (LEMAIRE et al., 2014), inclusive na diminuição da degradação do solo (MORAES et al., 2016).

Assim, torna-se necessário realizar o monitoramento da qualidade física a partir dos indicadores do solo, a fim de identificar possíveis modificações ocasionadas pelo conjunto de práticas de manejo adotado na área (CHERUBIN et al., 2016; FU et al., 2015). Sistemas com maior complexidade, como do presente estudo, que apresentam interações de diferentes componentes, aliado à presença contínua de espécies invasoras na área, necessita de uma ferramenta que seja capaz de identificar possíveis mudanças na qualidade do solo (CHERUBIN et al., 2016).

A utilização de diversos indicadores do solo, sejam eles químicos, físicos e biológicos do solo, têm como objetivo obter uma resposta integrada da qualidade. Além de ser considerado um procedimento útil para a avaliação dos efeitos das práticas agrícolas no funcionamento físico do solo (KARLEN et al., 2014). Segundo Cherubin et al. (2016), diversos estudos testaram estratégias de indexação de indicadores físicos do solo para fins específicos sob diferentes condições ambientais. O índice de qualidade física do solo (IQFS) pode ser uma ferramenta viável para a verificação do estado físico do solo, além de auxiliar nas tomadas de decisões diante as práticas de manejo sustentável (CAVALCANTI et al., 2020). A partir da escolha dos indicadores e definição da pontuação, peso e limites, o IQFS fornece informações consistentes, desde que haja conhecimento do equilíbrio correto entre os indicadores (CHERUBIN et al., 2016).

A hipótese do estudo foi de que os sistemas de produção agropecuária livres de pesticidas proporcionam condições adequadas para o funcionamento físico do solo em relação aos sistemas simples. Pois, os SIPAs sobressaem aos sistemas simples, visto que a integração de diferentes componentes pode contribuir para a redução da degradação física do solo. Desta forma, objetivou-se desenvolver e avaliar um índice

de qualidade física do solo em sistemas integrados e simples de produção agropecuária.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA

Idem ao item 1.4.1 do Capítulo 1.

### 2.4.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES DE SOLO

A amostragem de solo foi realizada em setembro de 2018, antes da semeadura da cultura do milho, após seis anos da implantação do experimento. Amostras de solo deformadas e indeformadas em anéis volumétricos (3,5 x 5 cm), foram coletadas no centro das camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. O solo das amostras deformadas foi peneirado em malha de 2 mm e seco em estufa a 40 °C por 48 h, para a determinação da textura do solo através da análise granulométrica pelo método do densímetro (GEE; OR, 2002), e densidade de partículas ( $\rho_p$ , Mg m<sup>-3</sup>) pelo método do balão volumétrico. O carbono orgânico do solo (COS) foi determinado pelo método da combustão seca em analisador marca Elementar®, modelo Vario El III (incineração a 950 °C).

As amostras indeformadas de solo foram coletadas e acondicionadas em geladeira a 5 °C até serem processadas. Posteriormente ao preparo das amostras, as mesmas foram saturadas, por meio da elevação gradual de uma lâmina d'água, até 2/3 da altura do anel, e então submetidas à determinação da condutividade hidráulica de solo saturada ( $K_s$ , mm h<sup>-1</sup>) através do método da carga decrescente (REYNOLDS; ELRICK, 2002), utilizando um aparato descrito em Cavalieri et al. (2009).

Após a determinação da  $K_s$ , as mesmas amostras foram equilibradas a um potencial mátrico de -6 kPa em mesa de tensão e a -10 kPa em câmara de Richards, medindo-se a massa úmida das amostras em cada potencial. Em seguida, as amostras foram submetidas à determinação da resistência do solo à penetração ( $R_p$ , MPa) utilizando-se um penetrômetro de bancada descrito em Figueiredo et al. (2011). A haste do penetrômetro, cujo cone possui área basal de 0,01445 m<sup>2</sup>, foi introduzida

até 2,5 cm da superfície do anel, numa velocidade de valor nominal de 10 mm min<sup>-1</sup>. A partir dos dados medidos de força, calculou-se a RP conforme a equação 1.

$$RP = \frac{F g}{A 10^6} \quad (1)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), F é a força medida (kgf), g é a aceleração da gravidade (m s<sup>-2</sup>) e A é a área basal do cone (m<sup>2</sup>).

Após o ensaio de RP, as amostras foram levadas à estufa à 105 °C, por 48 h, para a obtenção da massa seca do solo. A densidade do solo ( $\rho_s$ , Mg m<sup>-3</sup>) foi determinada conforme Grossman & Reinsch (2002). A umidade volumétrica determinada no potencial -10 kPa foi considerada como umidade na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ). A porosidade total ( $P_t$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) foi calculada pela equação descrita por Flint & Flint (2002) como  $P_t = 1 - (\rho_s / \rho_p)$ . Enquanto a microporosidade ( $Mic$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) foi considerada equivalente à umidade volumétrica do solo obtida no potencial mátrico de -6 kPa e a macroporosidade ( $Mac$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) foi calculada pela diferença entre a  $P_t$  e a  $Mic$ .

Outros indicadores foram calculados, tais como o espaço poroso preenchido com água (EPPA) por meio da razão entre a umidade volumétrica em -6 kPa e a  $P_t$  (WIENHOLD et al., 2009). A capacidade de armazenamento de água no solo (CAAS) foi calculada como  $CAAS = (\theta_{cc} / P_t)$  e a capacidade de aeração do solo (CAS) como  $CAS = (1 - CAAS)$  (REYNOLDS et al., 2002). O índice de estabilidade estrutural (IEE) foi determinado através da equação:  $IEE = [(COS \times 1,724) / (\text{silte} + \text{argila})] \times 100$ , em que COS = carbono orgânico do solo (g kg<sup>-1</sup>); 1,724 é um fator de conversão de COS para matéria orgânica do solo; silte e argila são frações de tamanho de partícula (g kg<sup>-1</sup>) (REYNOLDS et al., 2009). A difusividade relativa do gás ( $D_s/D_0$ ) foi estimada pela equação 2, proposta por Millington; Quirk (1961) e usada por Lima et al. (2020):

$$D_s/D_0 = \frac{CAS^\beta}{P_t^2} \quad (2)$$

em que  $D_s/D_0$  é a difusividade relativa do gás, CAS é a capacidade de aeração do solo,  $P_t$  é a porosidade total do solo e  $\beta$  é um parâmetro empírico, assumido por 10/3, sugerido por Millington; Quirk (1961).

A Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) foi realizada no momento da amostragem e seguiu a metodologia proposta por Guimarães et al. (2011).

### 2.4.3 ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

Foi determinado o índice de qualidade física do solo (IQFS) adaptado de Cherubin et al. (2016), para a camada de 0-0,20 m, a partir da média ponderada das camadas 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. A adaptação se deu a partir da utilização de um conjunto de indicadores físicos do solo diferente daquele usado no trabalho de Cherubin et al. (2016).

Foram realizadas três etapas para a obtenção do IQFS, em que primeiramente foram escolhidos os indicadores para representar quatro funções físicas críticas do solo:

- $f(i)$  capacidade do solo de suportar o crescimento radicular –  $\rho_s$ , RP e VESS;
- $f(ii)$  capacidade de armazenamento de água no solo – Mic, EPPA e CAAS;
- $f(iii)$  capacidade de aeração – Mac, CAS e  $D_s/D_0$ ;
- $f(iv)$  capacidade de resistir à erosão e à degradação física do solo – Ks, IEE e COS.

Na segunda etapa foi utilizada a técnica de transformação não linear dos dados descrita por Andrews et al. (2002). Baseando-se nas funções agrônômicas e ambientais do solo, os indicadores foram pontuados a partir de uma dessas curvas: curva sigmoide assíntota superior quando adotado “maior é melhor”, curva sigmoide assíntota inferior quando adotado “menor é melhor” e a curva Gaussiana quando adotado “ponto médio ótimo”. Sendo assim, as equações 3 e 4 foram usadas para “mais é melhor” e “menos é melhor”, respectivamente. Já para “ponto médio ótimo” as equações 3 e 4 foram utilizadas nas partes crescente e decrescente da curva, respectivamente.

$$\text{Nota} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{LB-LI}{x-LI}\right)^S\right]} \quad (3)$$

$$\text{Nota} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{LB-LS}{x-LS}\right)^S\right]} \quad (4)$$

em que, Nota é o valor do indicador do solo sem unidade variando de 0 a 1,  $a$  é a pontuação máxima que foi igual a 1, LB é a linha de base, LI é o limite inferior, LS é o limite superior,  $x$  é o valor obtido do indicador do solo e  $S$  representa a inclinação da equação equivalente a -2,5, como descrito em Cherubin et al. (2016). Para cada indicador do solo, os valores da linha de base e limite foram oriundos da literatura, conforme apresentado na TABELA 4.

TABELA 4 – LIMITES DOS INDICADORES DO SOLO E CURVAS DE PONTUAÇÃO

Função	Indicador	Unidade	Limite inferior	Linha de base	Limite superior	Ponto ótimo	Curva de pontuação	Referência
<i>f (i)</i> *	ps**	Mg m <sup>-3</sup>	1,1	1,25	1,4		Menor é melhor	Reichert et al. (2003)
	RP	MPa	2	3,6	5,1		Menor é melhor	Arshad et al. (1996); Ehlers et al. (1983)
	VESS	Escore	1,5	3	5		Menor é melhor	Ball et al. (2007); Guimarães et al. (2011)
<i>f (ii)</i>	Mic	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,15	0,2	0,35		Maior é melhor	Cherubin et al. (2016)
	EPPA	Sem unidade	0,15	0,3	0,8	0,6	Ótimo	Wienhold et al. (2009)
	CAAS	Sem unidade	0,3	0,45	0,8	0,66	Ótimo	Reynolds et al. (2002)
<i>f (iii)</i>	Mac	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,05	0,075	0,15		Maior é melhor	Reynolds et al. (2002)
	CAS	Sem unidade	0,15	0,25	0,4	0,34	Ótimo	Reynolds et al. (2002)
	D <sub>s</sub> /D <sub>0</sub>	Sem unidade	0,005	0,02	0,04		Maior é melhor	Grable e Siemer (1968); Kadžienž et al. (2011)
<i>f (iv)</i>	Ks	mm h <sup>-1</sup>	20	75	150		Maior é melhor	USDA-RRCS (2001)
	IEE	%	5	7	9		Maior é melhor	Reynolds et al. (2009)
	COS	g dm <sup>-3</sup>	9	15	20		Maior é melhor	Pavinato et al. (2017)

\**f (i)* capacidade do solo de suportar o crescimento radicular, *f (ii)* capacidade de armazenamento de água no solo, *f (iii)* capacidade de aeração e *f (iv)* resistência do solo à erosão e degradação física. \*\*ps: densidade do solo, RP: resistência do solo à penetração, VESS: avaliação visual da estrutura do solo, Mic: microporosidade, EPPA: espaço poroso preenchido com água, CAAS: capacidade de armazenamento de água no solo, Mac: macroporosidade, CAS: capacidade de aeração do solo, D<sub>s</sub>/D<sub>0</sub>: difusividade relativa do gás, Ks: condutividade hidráulica saturada, IEE: índice estabilidade estrutural, F: friabilidade, COS: carbono orgânico do solo.

A terceira etapa consistiu na integração dos valores transformados em um índice a partir da multiplicação das pontuações dos indicadores pelo peso da função, conforme equação 5:

$$IQFS = \sum f(\text{notas}).p \quad (5)$$

em que IQFS é o índice de qualidade física do solo; f(notas) são as notas obtidas para cada função e; p é o peso de cada função, de acordo com o exemplo da TABELA 5.

TABELA 5 – MODELO DA ESTRUTURA APLICADA PARA O DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO (IQFS)

Função física do solo	Peso	Indicadores do solo	Peso	Nota do indicador transformado	Escore do indicador do solo	Escore da função física física $\Sigma (II \times III)$	Escore da função física ponderada	IQFS
	(I)		(II)	(III)	(II x III)	IV	(IV x I)	$\Sigma (IV \times I)$
f(i)*	0,25	ps	0,33	0,76	0,25	0,87	0,22	0,94
		RP	0,33	0,89	0,29			
		VESS	0,33	1,00	0,33			
f(ii)	0,25	Mic	0,33	1,00	0,33	1,00	0,25	
		EPPA	0,33	1,00	0,33			
		CAAS	0,33	1,00	0,33			
f(iii)	0,25	Mac	0,33	0,92	0,30	0,87	0,22	
		CAS	0,33	0,89	0,29			
		D <sub>s</sub> /D <sub>0</sub>	0,33	0,85	0,28			
f(iv)	0,25	Ks	0,33	1,00	0,33	1,00	0,25	
		IEE	0,33	1,00	0,33			
		COS	0,33	1,00	0,33			

FONTE: O autor (2020).

\*f (i) capacidade do solo de suportar o crescimento radicular, f (ii) equilíbrio entre fluxos e capacidade de armazenamento de água no solo, f (iii) capacidade de aeração e f (iv) resistência do solo à erosão e degradação física.

#### 2.4.1 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

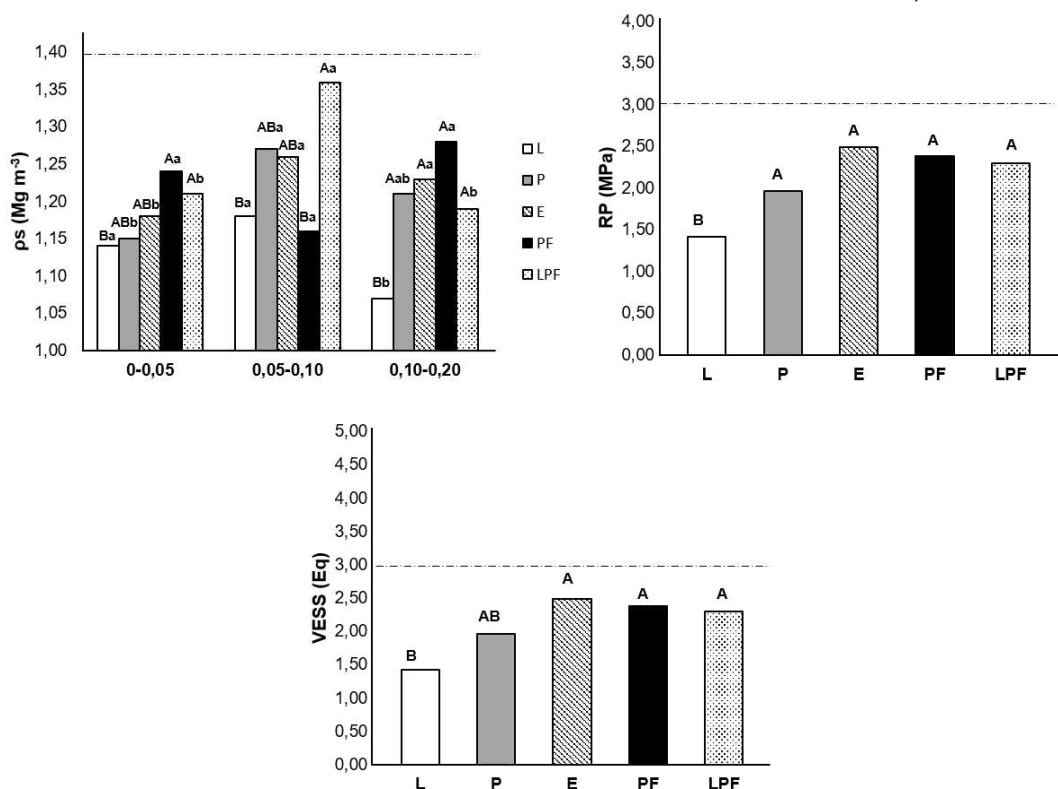
A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, quando anormais, transformados por Box-Cox, e posteriormente, submetidos à análise de variância (Anova). Devido à alta variabilidade dos resultados de Ks, foi necessário realizar a transformação dos dados após a exclusão dos outliers. Havendo diferença entre as médias dos sistemas de produção, elas foram comparadas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R® (R CORE TEAM, 2015).

## 2.5 RESULTADOS

### 2.5.1 Indicadores de suporte ao crescimento radicular

Para os valores médios de densidade do solo houve interação significativa entre os sistemas e camadas avaliadas (FIGURA 9). Entre os tratamentos analisados, a L apresentou o menor valor médio de densidade do solo ( $1,14 \text{ Mg m}^{-3}$ ), na camada 0-0,05 m, e os demais tratamentos não foram significativamente diferentes entre si. Já na camada de 0,05-0,10, a LPF apresentou a maior densidade do solo ( $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e os sistemas L e PF os menores valores ( $1,18$  e  $1,16 \text{ Mg m}^{-3}$ ), respectivamente. Os sistemas P, E e LPF apresentaram aumento significativo da densidade do solo na camada de 0,05-0,10 m ( $1,27$ ,  $1,26$  e  $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ ), respectivamente.

FIGURA 9 – A) DENSIDADE DO SOLO ( $\rho_s$ ,  $\text{Mg m}^{-3}$ ), B) RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP, MPa), C) AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS, Eq), NAS CAMADAS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF).



FONTE: O autor (2020).

\*LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ).



Para a resistência do solo à penetração (RP) não houve interação significativa entre os sistemas e camadas, porém apresentaram diferença estatística entre os sistemas (FIGURA 9). Para RP, a L apresentou o menor valor médio (1,48 MPa) quando comparado com os sistemas P, E, PF e LPF (1,89, 1,79, 1,90 e 1,88 MPa), respectivamente.

Já para a avaliação visual da estrutura do solo (VESS), a L apresentou a menor nota (1,42) não diferindo estatisticamente da P (1,96). As maiores notas foram observadas nos sistemas E, PF e LPF (2,49, 2,39 e 2,30), respectivamente (FIGURA 9), sendo estatisticamente iguais à P.

### 2.5.2 Indicadores de armazenamento de água no solo

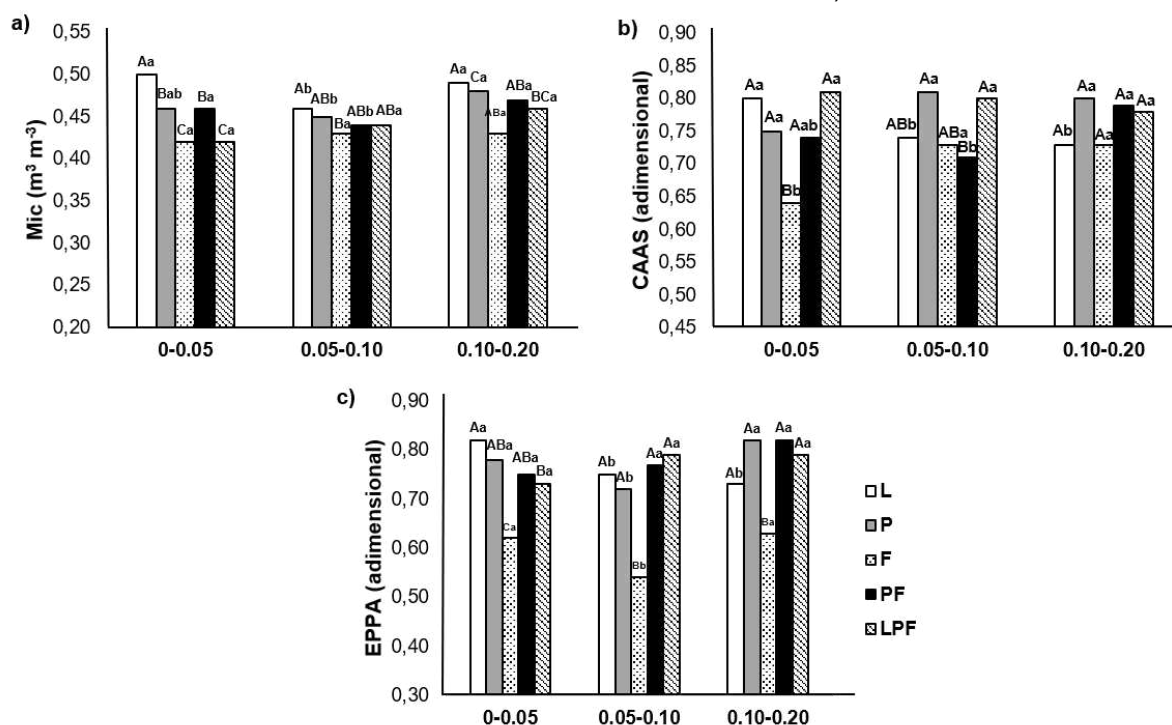
Analisando os atributos relacionados à capacidade de armazenamento de água no solo, houve interação significativa entre sistemas e camadas, sendo que para 0-0,05 m a L apresentou o maior valor de Mic ( $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) dentre os sistemas avaliados (FIGURA 10). Os sistemas E e LPF obtiveram os menores valores médios ( $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), e P e PF foram intermediários ( $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Na camada de 0,05-0,10 m, houve redução significativa da Mic em relação às outras camadas estudadas, com exceção de E e LPF, que apresentaram os menores valores de Mic de  $0,43$  e  $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente.

O menor valor de CAAS foi observado no sistema E (0,64), obtendo diferença significativa em relação aos outros sistemas na camada 0-0,05 m. Já na camada 0,05-0,10 m o sistema PF apresentou o menor valor médio de CAAS (0,71), contudo não diferiu estatisticamente de L e E (0,74 e 0,73), respectivamente, enquanto na camada 0,10-0,20 não houve diferença entre os sistemas avaliados (FIGURA 10).

Os sistemas L, E e PF apresentaram diferença entre as camadas, sendo que a L apresentou uma redução do valor médio da CAAS da camada 0-0,05 m para as demais camadas. Enquanto para E ocorreu aumento da CAAS comparando-se a camada 0-0,05 m com as outras camadas, o sistema PF, por sua vez, aumentou da camada 0,05-0,10 m para 0,10-0,20 m, mas foi estatisticamente igual à camada de 0-0,05 m.

FIGURA 10 –A) MICROPOROSIDADE (Mic,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), B) CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (CAAS), C) ESPAÇO POROSO PREENCHIDO DE ÁGUA (EPPA) NOS SISTEMAS

DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF) E NAS CAMADAS.



FONTE: O autor (2020).

\*LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ).

Os valores médios de EPPA apresentaram interação significativa entre os sistemas e camadas (FIGURA 10). Na camada 0-0,05 m os sistemas L, P e PF apresentaram os maiores valores (0,82, 0,78 e 0,75), respectivamente, diferindo dos demais sistemas. O sistema E apresentou os menores valores médios de EPPA nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (0,54 e 0,63), respectivamente.

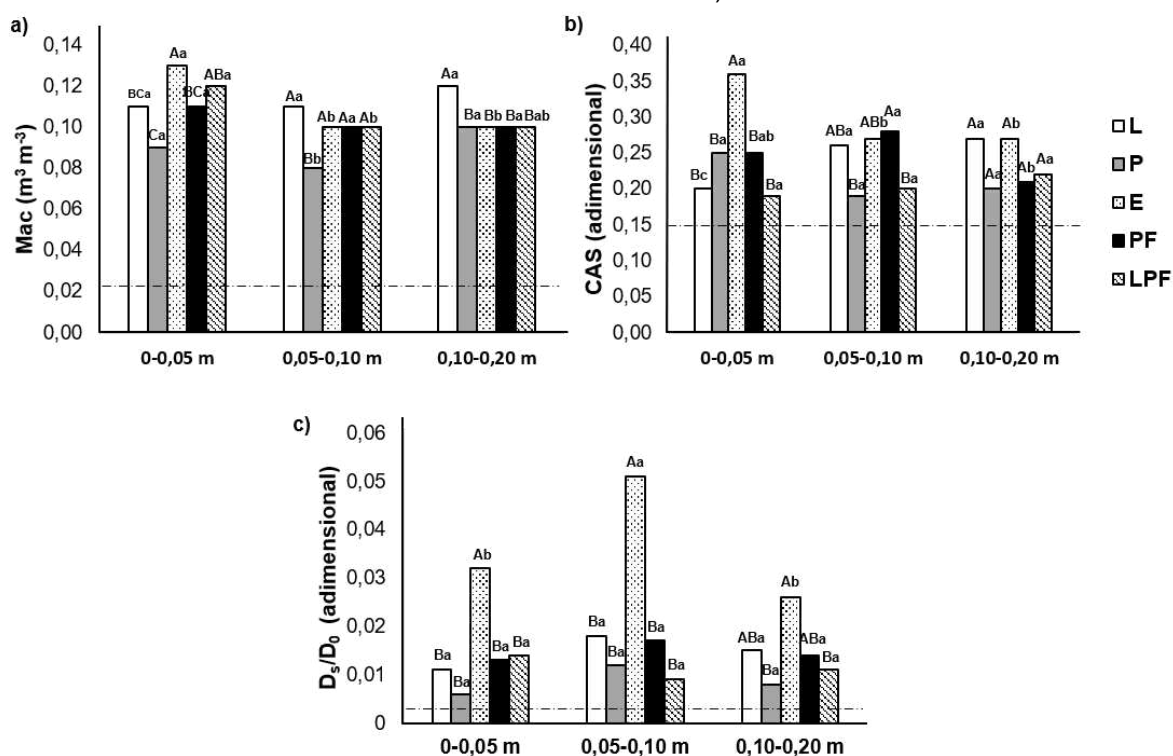
Na camada 0,10-0,20 m, os sistemas P (0,82) e PF (0,82) apresentaram os maiores valores. Na comparação entre as camadas, a L demonstrou redução do valor médio de EPPA da camada 0-0,05 m para 0,05-0,10 m, os sistemas P e E apresentaram uma redução apenas na camada 0,05-0,10 m. Os sistemas integrados não demonstraram diferença significativa entre as camadas avaliadas.

### 2.5.3 Indicadores de aeração do solo

Para a macroporosidade, na camada 0-0,05 m a E apresentou o maior valor ( $0,13 m^3 m^{-3}$ ), porém não diferiu com a LPF ( $0,12 m^3 m^{-3}$ ) (FIGURA 11). A P apresentou os menores valores de Mac nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m ( $0,09$  e  $0,08 m^3 m^{-3}$ ).

<sup>3)</sup>, respectivamente. Na camada 0,05-0,10 m o sistema P apresentou o menor valor médio de macroporosidade em relação as demais camadas avaliadas. Assim como, observando entre as camadas, a P e LPF demonstraram uma redução da Mac na camada de 0,05-0,10 m. Na comparação entre camadas, o E apresentou a maior Mac na camada de 0-0,05 m, enquanto a L e a PF não apresentaram diferença estatística entre as camadas.

FIGURA 11 – A) MACROPOROSIDADE (Mac,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), B) CAPACIDADE DE AERAÇÃO NO SOLO (CAS), C) DIFUSIVIDADE RELATIVA DO GÁS ( $D_s/D_0$ ) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALÍPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF) E NAS CAMADAS.



FORNE: O autor (2020).

\*LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ).

Houve interação significativa para os valores médios de CAS e  $D_s/D_0$  para os sistemas e camadas avaliados (FIGURA 11). Na camada 0-0,05 m o sistema E apresentou os maiores valores médios de CAS (0,36) e  $D_s/D_0$  (0,032), diferindo dos demais sistemas. Já na camada 0,05-0,10 m o sistema PF, juntamente com a L e E, demonstraram os maiores valores de CAS (0,28, 0,26 e 0,27), porém somente o sistema E apresentou o maior valor de  $D_s/D_0$  (0,051).

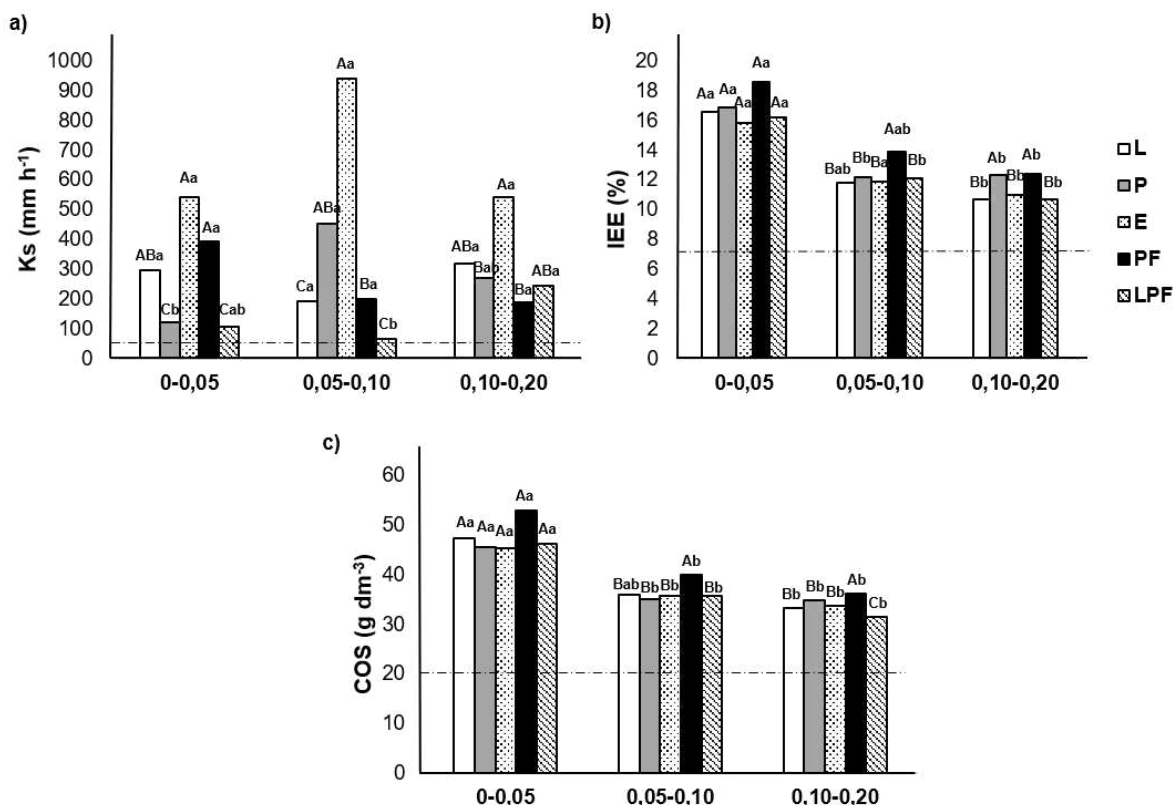
Na camada de 0,10-0,20 não houve diferença significativa entre os sistemas para CAS, mas para  $D_s/D_0$  o E demonstrou o maior valor médio (0,026), diferindo dos demais sistemas. Entre as camadas, a L apresentou aumento significativo no valor de CAS da camada 0-0,05 m para 0,05-0,10 m, no sistema E houve redução do valor de CAS da camada 0-0,05 m para 0,05-0,10 m e redução de  $D_s/D_0$  da camada 0,05-0,10 m para 0,10-0,20 m. No sistema PF houve redução da CAS da camada 0,05-0,10 m para 0,10-0,20 m e os demais sistemas não apresentaram variação significativa entre as camadas.

#### 2.5.4 Indicadores de resistência à erosão e degradação do solo

Os valores médios de  $K_s$  entre sistemas e camadas estão apresentados na Figura 12. Na camada de 0-0,05 m os sistemas E e PF apresentaram as maiores  $K_s$  (541 e 393  $\text{mm h}^{-1}$ ) respectivamente, não diferindo significativamente da L (297  $\text{mm h}^{-1}$ ), enquanto os tratamentos P e LPF obtiveram significativamente os menores valores nesta mesma camada (121 e 106  $\text{mm h}^{-1}$ ) respectivamente. Na camada de 0,05-0,10 m, os tratamentos com o componente florestal: E, PF e LPF diferiram estatisticamente, sendo o maior valor médio no E (940  $\text{mm h}^{-1}$ ) e o menor em LPF (67  $\text{mm h}^{-1}$ ).

Já na camada de 0,10-0,20 m, os sistemas com maiores valores de  $K_s$  foram o E (542  $\text{mm h}^{-1}$ ), porém não diferindo da L e LPF (318 e 246  $\text{mm h}^{-1}$ ), respectivamente. Houve interação significativa entre as camadas e tratamentos. Os sistemas L, E e PF não apresentaram diferença estatística entre as camadas. A P apresentou a menor  $K_s$  na camada de 0-0,05 m e o maior valor médio na camada de 0,05-0,10 m. A LPF apresentou o menor valor médio na camada de 0,05-0,10 m, porém não diferiu estatisticamente da camada de 0-0,05 m.

FIGURA 12 – A) CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO ( $K_s$ ,  $\text{mm h}^{-1}$ ), B) CARBONO ORGÂNICO DO SOLO (COS,  $\text{g dm}^{-3}$ ), C) ÍNDICE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL (IEE, %) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA - PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF) E NAS CAMADAS.



FONTE: O autor (2020).

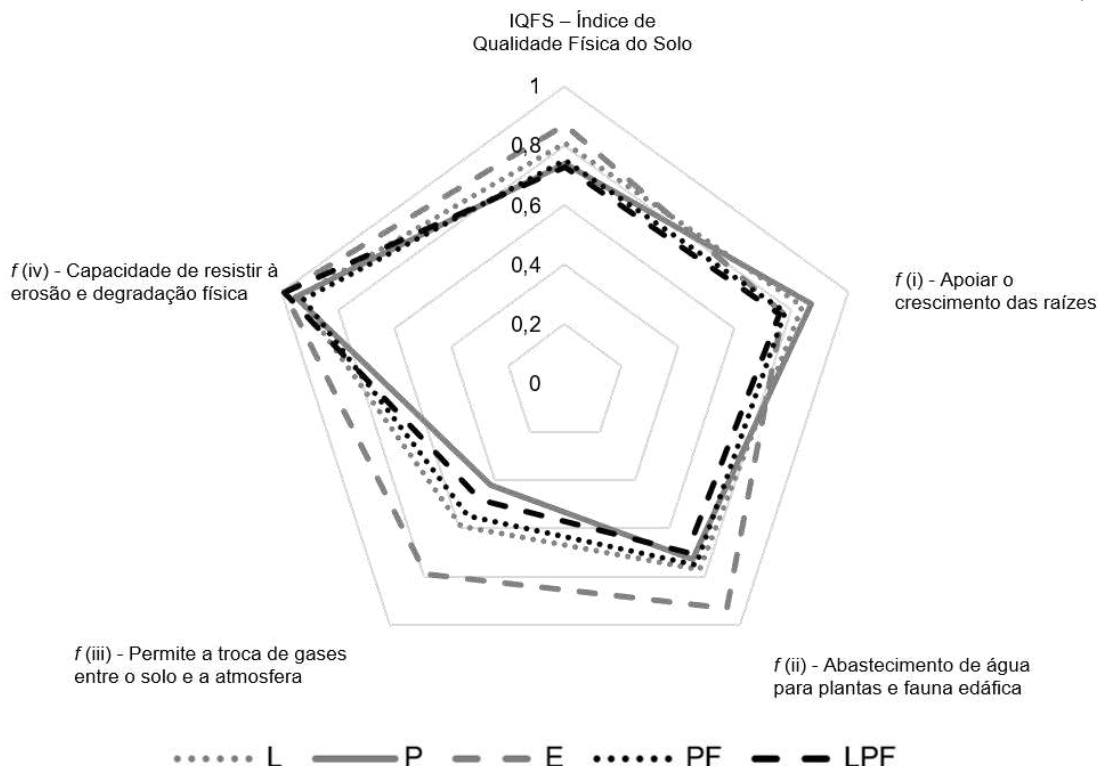
\*LETRAS MAIÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM AS CAMADAS. MÉDIAS SEGUIDAS DE LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ).

Houve interação significativa entre as camadas e os sistemas avaliados para os valores médios de carbono orgânico do solo e índice de estabilidade estrutural (FIGURA 12). Todos os sistemas apresentaram os maiores valores de COS e IEE na camada de 0-0,05 m e não diferiram entre si. Já nas camadas 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, o sistema PF apresentou os maiores valores de COS (40,0 e 36,1 g dm<sup>-3</sup>) e de IEE (13,9 e 12,4%) respectivamente, diferindo significativamente dos demais sistemas. Todos os sistemas apresentaram redução de COS e IEE entre a camada superficial (0-0,05 m) e as demais profundidades.

### 2.5.5 Índice de qualidade física do solo – IQFS

Todos os indicadores físicos do solo apresentados anteriormente compuseram as notas gerais para cada função física do solo e IQFS, e estes estão apresentados na FIGURA 13.

FIGURA 13 – FUNÇÕES FÍSICAS DO SOLO E ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO (IQFS) REFERENTES AOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (LAVOURA - L; PECUÁRIA - P; EUCALIPTO - E; PECUÁRIA-FLORESTA- PF; LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - LPF).



Sistemas	Funções físicas do solo				IQFS
	f(i)	f(ii)	f(iii)	f(iv)	
L	0,87 a*	0,77 b	0,59 b	0,74 ab	0,74 ab
P	0,79 a	0,73 b	0,43 c	0,78 ab	0,68 b
E	0,81 b	0,93 a	0,79 a	0,81 a	0,84 a
PF	0,79 b	0,76 b	0,55 bc	0,74 b	0,71b
LPF	0,81 b	0,70 b	0,48 bc	0,79 a	0,70 b

FONTE: O autor (2020).

\*LETRAS MINÚSCULAS COMPARAM OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA. LETRAS IGUAIS NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE ENTRE SI PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ).

Para  $f(i)$  que corresponde em apoiar o crescimento radicular, foi observado diferença estatística, sendo que os sistemas L e P apresentaram os maiores valores (0,94 e 0,87), respectivamente. Já para  $f(ii)$  relacionado ao suprimento de água para plantas e fauna edáfica, o sistema E apresentou a maior nota (0,93), diferindo estatisticamente dos demais sistemas.

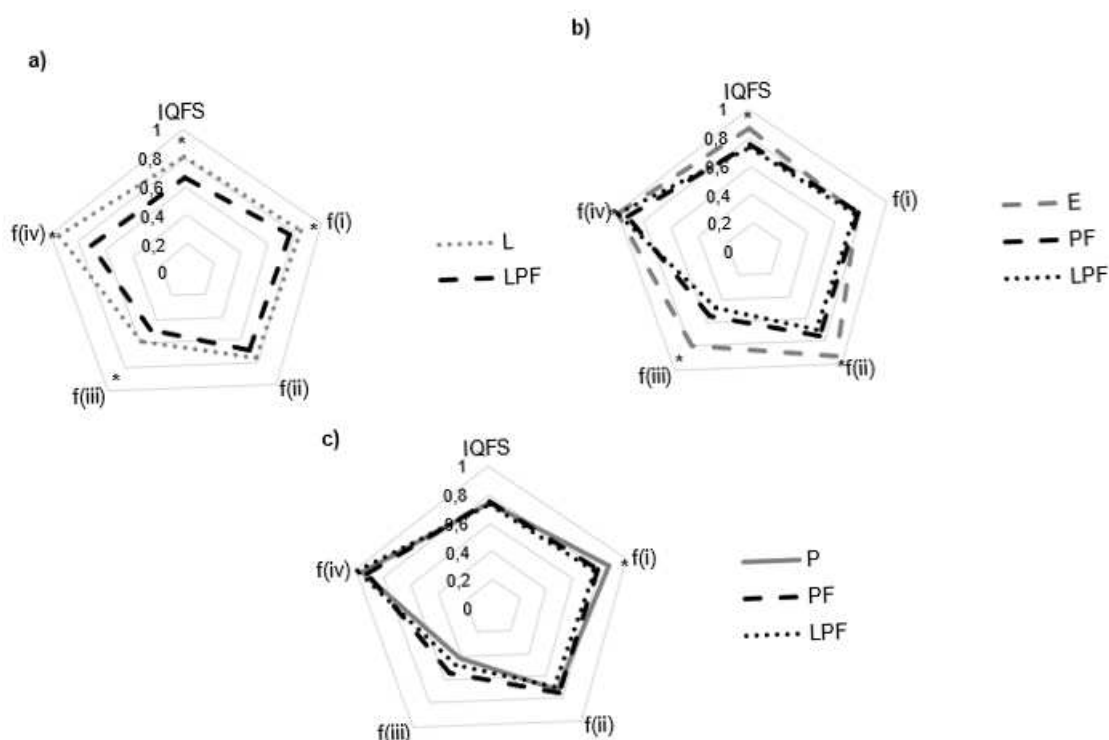
Para  $f(iii)$ , referente à troca de gases entre o solo e a atmosfera, houve diferença significativa entre os sistemas, em que a E apresentou a maior nota (0,79), ou seja, a melhor aeração do solo e a P a menor nota (0,43). Para a  $f(iv)$  relacionado à capacidade do solo de resistir à erosão e degradação física, foi observado que o

sistema E e LPF apresentaram as maiores notas (0,99) ambos, porém diferiram significativamente apenas com o sistema PF (0,92).

De forma geral, a qualidade física do solo apresentou diferença significativa entre os sistemas avaliados, através IQFS, sendo que o E (0,87), acompanhado da L (0,81) apresentaram os maiores valores em comparação aos demais sistemas.

Na FIGURA 14 são mostradas as comparações das funções físicas do solo e dos índices de qualidade física do solo entre os sistemas avaliados. Nota-se que na comparação da L e LPF (a) houve diferença significativa nas funções físicas do solo i, ii e iv, e no IQFS. O IQFS da L foi 9,9 % superior em relação ao da LPF.

FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA COMPARAÇÃO DAS FUNÇÕES FÍSICAS DO SOLO E DO ÍNDICE DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA: A) LAVOURA (L) X LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF), B) PECUÁRIA (P) X PECUÁRIA-FLORESTA (PF) X LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF), C) EUCALIPTO (E) X PECUÁRIA-FLORESTA (PF) X LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (LPF) NA CAMADA DE 0-0,20 M.



FONTE: O autor (2020).

\*DIFERENÇA SIGNIFICATIVA PELO TESTE TUKEY ( $P < 0,05$ ).

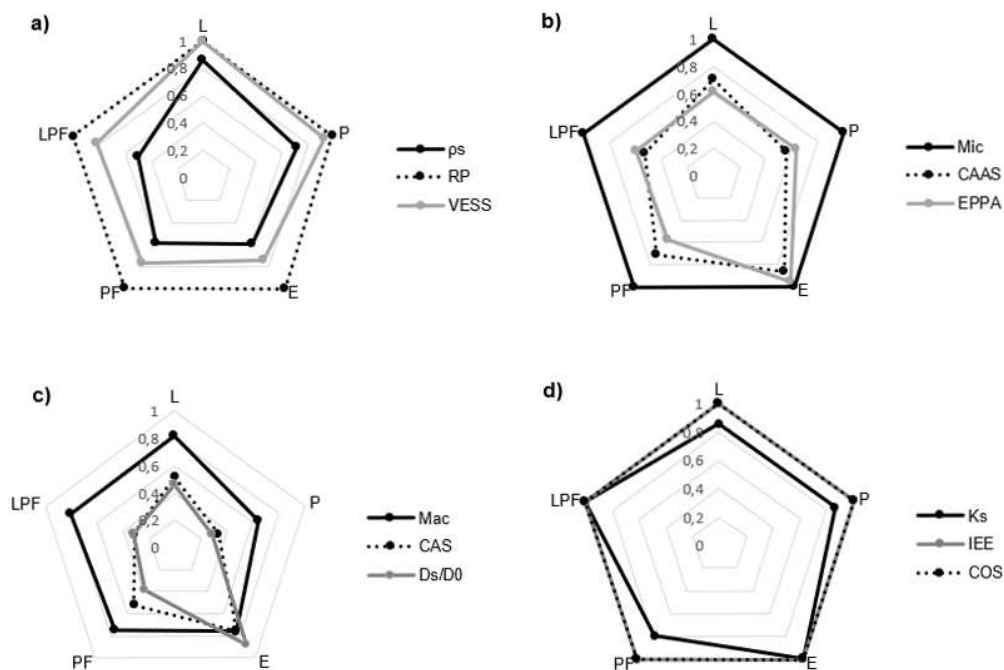
Comparando os sistemas E, PF e LPF, foi observado diferença significativa, em que o IQFS do PF foi 13,8 % menor em relação ao E. As funções ii, iii e iv diferiram

significativamente, sendo que a PF foi 19,3 %, 30,4% e 7,1 % menor para as funções ii, iii e iv, respectivamente, quando comparado com o E.

Na comparação entre os sistemas F e LPF, também foi observado diferença significativa para o IQFS, sendo que a PF foi inferior (-16,1 %) em relação ao E. A LPF apresentou as menores pontuações das funções ii (-24,7 %) e iii (-39,2 %) quando comparado com o E. Já na comparação dos sistemas P, PF e LPF, houve diferença significativa apenas na função i, sendo que a PF e LPF foram inferiores (10,3% e 12,5%) respectivamente, ao sistema P.

Diante das funções físicas do solo, os indicadores demonstraram diferentes desempenhos para os sistemas de produção agropecuária (FIGURA 15).

FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS NOTAS DOS INDICADORES FÍSICOS DO SOLO (ps - DENSIDADE DO SOLO, RP - RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO, VESS - AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO, Mic - MICROPOROSIDADE, CAAS – CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EPPA – ESPAÇO POROSO PREENCHIDO DE ÁGUA, Mac - MACROPOROSIDADE, CAS – CAPACIDADE DE AERAÇÃO NO SOLO,  $D_s/D_0$  - DIFUSIVIDADE RELATIVA DO GÁS,  $K_s$  - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO, COS – CARBONO ORGÂNICO DO SOLO E IEE - ÍNDICE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL) NAS FUNÇÕES FÍSICAS DO SOLO: A) F (I), B) F (II), C) F (III), D) F (IV) NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (L – LAVOURA, P – PECUÁRIA, E – EUCALIPTO, PF – PECUÁRIA-FLORESTA, LPF – LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA) NA CAMADA DE 0-0,20 M.



FONTE: O autor (2020).



Desta forma, os sistemas E e L proporcionaram as maiores pontuações das funções referentes ao abastecimento de água para plantas e fauna edáfica, aeração do solo e, conseqüentemente, a capacidade de resistir à erosão e degradação física.

## 2.6 DISCUSSÃO

### 2.6.1 Capacidade de suporte ao crescimento radicular

Todos os indicadores físicos que compõem esta função apresentaram valores elevados, demonstrando que os sistemas proporcionaram efeitos positivos na capacidade de apoiar o crescimento radicular (FIGURA 9). As propriedades físicas do solo são importantes indicadores de mudanças estruturais, já que as plantas necessitam de condições favoráveis para o seu crescimento e desenvolvimento radicular (SILVA et al., 2017).

Diante disso, o conhecimento das alterações da densidade do solo devido ao manejo adotado permite identificar possível degradação ou melhoria da qualidade e da produtividade do sistema. Borges et al. (2019) observaram aumento da densidade do solo na linha do eucalipto no sistema LPF em relação a entrelinha das árvores. Os autores sugerem que a elevação da densidade do solo seja devido a concentração dos animais em busca de conforto térmico. Entretanto, não houve diferença significativa entre a P e os sistemas integrados (PF e LPF) e não apresentaram valores acima do limite crítico ( $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ ) de acordo com Reichert et al. (2003). O sistema E demonstrou um aumento de densidade do solo na camada de 0,05-0,10 m devido, possivelmente, ao efeito do rearranjo das partículas do solo promovido por práticas de desrama das árvores e roçadas mecânica das plantas invasoras entre os eucaliptos (DEDECEK & GAVA, 2005) ao longo do período após a implantação, visto que não ocorre pisoteio animal neste sistema.

A RP foi determinada na umidade equivalente ao potencial mátrico de -10 kPa, ou seja, correspondente a umidade na capacidade de campo (OTTONI FILHO et al., 2014; REICHERT et al., 2016). Segundo Silveira et al. (2010) a umidade interfere na coesão entre as partículas sólidas do solo, em que à medida que reduz o conteúdo de água, aumenta a proximidade entre as partículas e, conseqüentemente, dificulta a separação por forças externas, tornando o solo mais resistente à penetração.

Assim, quando este solo se apresentar com umidade abaixo da capacidade de campo possivelmente os valores de resistência à penetração serão superiores. Diante desta uniformidade de umidade do solo, foi possível comparar a RP e foi observado que a L obteve a menor RP.

Ralisch et al. (2008) avaliaram campo nativo, lavoura sob preparo convencional, lavoura sob semeadura direta e pastagem e observaram que a pastagem apresentou aumento da RP nas camadas superficiais (0-0,20 m), conferindo esse efeito ao pisoteio animal. Vale ressaltar que mudanças nas propriedades físicas do solo ocorrem devido a vários fatores (textura do solo, umidade do solo, altura do pasto, intensidade de pastejo, quantidade de resíduo vegetal da forragem) os quais podem maximizar o efeito do pisoteio animal (ANDREOLLA et al., 2016).

Entretanto, considerando a RP de 3,0 MPa como valor limitante para o crescimento das plantas (COLOMBI et al., 2018; HÅKANSSON; LIPIEC, 2000) e para gramíneas sob plantio direto (LEÃO et al., 2004), os valores obtidos nos sistemas avaliados demonstraram uma condição física do solo favorável para o desenvolvimento radicular na umidade considerada equivalente à capacidade de campo.

Os menores valores de RP da L se devem, provavelmente, pela forma como é conduzido o experimento, ou seja, sem o uso de herbicidas e sem a prática de revolvimento do solo, favorecendo inclusive os efeitos negativos do tráfego de máquinas. Trabalhos realizados na mesma área experimental demonstraram presença de diversas espécies de plantas daninhas ao longo do ciclo das culturas agrícolas de verão (LAI, 2020; LIMA, 2016).

Assim, a L apresentou a maior diversidade de plantas ao longo do tempo e, conseqüentemente, maior diversidade de sistemas radiculares. Estes resultados sugerem o aumento da agregação e estruturação do solo a partir da ação das raízes (LAVELLE et al., 2020; REICHERT et al., 2003), formação de bioporos (MUNKHOLM et al., 2013) e acúmulo de matéria orgânica no solo, propiciando um efeito positivo na qualidade física do solo (MORAES et al., 2014; REICHERT et al., 2016; JOHANNES et al., 2017). Lavelle et al. (2020) relataram que o processo de agregação do solo pelas raízes ocorre a partir do rearranjo das partículas sólidas devido ao crescimento radicular, pela liberação de exsudatos radiculares através de atividades rizosféricas e fonte de energia para os microrganismos em sua decomposição.

Quanto ao VESS, as notas dos sistemas indicaram uma boa estrutura do solo, uma vez que esta análise permite avaliar a qualidade estrutural, a qual expressa o manejo agrícola adotado.

#### 2.6.2 Capacidade de armazenamento de água no solo

O sistema L demonstrou maior Mic em relação aos demais sistemas (FIGURA 10). Possivelmente o não revolvimento do solo promoveu o rearranjo das partículas sólidas e, conseqüentemente, aumento do volume dos microporos. Reichert et al. (2016) demonstraram que lavoura sob plantio direto após cinco anos, sob um Latossolo Vermelho, apresentou aumento na Mic, principalmente na camada superficial (0-0,07 m), devido ao rearranjo das partículas, melhorando a retenção de água no solo e disponibilidade hídrica para as plantas.

Diante da redução de Mic em profundidade, os sistemas demonstraram valores médios superiores àqueles considerados limitantes ao crescimento vegetal ( $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) de acordo com Cherubin et al. (2016). Borges et al. (2019) avaliaram indicadores físicos do solo, dentre eles a microporosidade em sistema Lavoura-Pecuária-Floresta. Estes autores observaram que houve acréscimo no volume de microporos e atribuíram este aumento devido ao incremento de matéria orgânica e, conseqüentemente, melhoria da estrutura do solo.

Quanto a CAAS, apesar das diferenças encontradas entre sistemas e camadas (FIGURA 10), os valores de CAAS considerados acima do adequado (0,80) foram observados apenas no LPF e P, podendo prejudicar o crescimento e as funções do sistema radicular, devido a redução da aeração do solo (REYNOLDS et al., 2002). Com isso, a pontuação desta função foi elevada para o sistema E, devido as notas dos indicadores da Mic, CAAS e EPPA estarem mais próximas aos valores adequados para o crescimento e desenvolvimento vegetal.

#### 2.6.3 Capacidade de aeração no solo

Dentre os sistemas, a P apresentou valores de Mac inferiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m (FIGURA 11), que é o limite mínimo para a aeração do solo e fornecimento de oxigênio para as raízes das plantas (GRABLE; SIEMER, 1968). Esta redução no sistema P provavelmente ocorreu devido ao pisoteio

animal aliado a umidade do solo. Visto que em razão da relação entre a força aplicada e a área de contato, o pisoteio animal concentra as pressões na camada superficial, geralmente até 10 cm de profundidade, em solos de sistema integrado lavoura-pecuária sob plantio direto (CONTE et al., 2011). Enquanto a umidade proporciona maior facilidade no rearranjo das partículas sólidas do solo.

Entretanto, Andreolla et al. (2016) avaliaram um Latossolo Bruno Distroférrico típico sob plantio direto em clima subtropical, afirmaram que a diminuição do volume de macroporos pode ser reversível pelo incremento de matéria orgânica e das raízes das culturas.

Em razão da maior macroporosidade na camada 0-0,05 m, o sistema E apresentou os maiores valores médios de CAS e  $D_s/D_0$ , diferindo dos demais sistemas (FIGURA 11). Visto que a CAS e  $D_s/D_0$  estão correlacionadas pelo volume de macroporos. Foi observado nessa função que todos os sistemas demonstraram notas inferiores, ou seja, abaixo da faixa adequada em relação as demais funções físicas do solo. Outro fato observado nesta função foi que os sistemas que possuem o componente animal obtiveram notas menores de 55% em comparação a nota máxima (1,00). A CAS e a  $D_s/D_0$  foram os principais indicadores que reduziram a nota de aeração do solo.

A CAS é afetada pela textura, umidade e estrutura do solo, esta última é susceptível a deformações, as quais reduzem a porosidade de ar, continuidade dos poros e a permeabilidade ao ar (CHEN et al., 2014; MENTGES et al., 2016). Tendo em vista que a estrutura do solo pode ser influenciada pelo manejo adotado (HAMILTON et al., 2019; SOANE et al., 2012), áreas sob plantio direto, embora apresentam redução da porosidade total, demonstram poros estáveis e funcionais, devido a maior continuidade na rede de poros, favorecendo a aeração do solo (MENTGES et al., 2016; MOREIRA et al., 2016).

O pisoteio animal concentra as pressões, geralmente até 10 cm de profundidade, em solos de sistema integrado lavoura-pecuária sob plantio direto (Conte et al., 2011), reduzindo a Mac e, conseqüentemente, a porosidade total e  $D_s/D_0$ . Entretanto, segundo Rodrigues et al. (2011) este sistema também contribui para o aumento da tortuosidade dos poros, podendo dificultar na permeabilidade do ar no solo.

Reynolds et al. (2002) descreve CAS = 0,34 como valor ótimo em relação a outros critérios que expressam boa condição física do solo. Grable e Siemer (1968),

relataram que os valores críticos de  $D_s/D_0$  para o crescimento das plantas variam de 0,005 para as culturas de tomate e azevém e de 0,02 para a cultura do milho, assim no presente estudo foi adotado 0,005 como valor crítico com o intuito de contemplar um maior número de espécies vegetais.

#### 2.6.4 Capacidade de resistência à erosão e degradação do solo

Foi observado que os valores de  $K_s$  foram superiores aos limites críticos indicados para a maioria das culturas agrícolas (FIGURA 12). O não revolvimento do solo, assim como a decomposição de raízes, podem ter alterado as características morfológicas da rede de poros, proporcionando maior continuidade destes poros e, conseqüentemente, inferindo na  $K_s$  (OLIVEIRA et al., 2020; SCHLÜTER et al., 2020). Segundo De Pue et al. (2019), altos valores de  $K_s$  podem ser atribuídos fluxos preferenciais, como presença de megaporos e rachaduras no solo, em razão da variabilidade espacial dos poros, como também presença de bioporos formados a partir da decomposição das raízes das árvores (SARTO et al., 2020).

Já os menores valores de  $K_s$  nos sistemas integrados podem estar relacionados ao comportamento animal. Campos (2019) realizou um estudo para comparar o comportamento diurno de bovinos de corte nos sistemas P (sem árvores), PF e LPF (com árvores) na mesma área experimental do presente trabalho. Os resultados demonstraram que o tempo de pastejo nas 12 horas de avaliação na P (49,44 %) foi significativamente menor em relação aos tratamentos PF (52,66 %) e LPF (59,51 %). Ou seja, o componente arbóreo alterou o comportamento dos animais a pasto. O autor observou que a presença das árvores promoveu alterações morfológicas como estiolamento, redução do perfilhamento e redução do número de folhas por perfilho, devido a redução da radiação fotossintética ativa que alcança a forragem.

Desta forma, o autor relata que os animais dos sistemas integrados realizaram mais bocados aumentando o tempo total do pastejo e, conseqüentemente, promoveu maior pisoteio em busca de pasto. Possivelmente, este comportamento animal refletiu no pisoteio alterando a estrutura do solo e, por consequência, na condutividade hidráulica saturada.

Quanto aos valores de COS, Loss (2014), avaliou os atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de uso e observaram que a integração do eucalipto com a

pastagem após cinco anos proporcionou o aumento das frações da matéria orgânica do solo, quando comparado com os sistemas simples (pastagem e floresta plantada).

Entretanto, no presente estudo este aumento de COS apresentado no sistema PF não foi observado na LPF. GALZERANO; MORGADO, (2008) também demonstraram que, sistemas integrados com floresta plantada promovem maior oferta contínua de matéria orgânica do solo, em razão dos resíduos orgânicos oriundos das árvores, e são capazes de favorecer as propriedades físicas do solo, através do acúmulo de carbono orgânico, e que tende a aumentar ao longo dos anos (NEVES et al., 2004).

Nesta função, os indicadores IEE e COS apresentaram notas máximas para todos os sistemas (FIGURA 12). Além disso, todos os valores médios de IEE foram superiores ao valor crítico (7 %), ou seja, valores abaixo a este são prejudiciais aos processos e funções ecossistêmicas do solo (REYNOLDS et al., 2009).

O aumento do teor de COS aliado a atividade biológica no solo contribuem para a formação e estabilidade dos agregados, maximizando a resistência e resiliência do solo à degradação (LAVELLE et al., 2020; SIX et al., 2004; ZHU et al., 2017).

Outros fatores que contribuem para o incremento de COS é a diversidade de culturas no sistema (LEHMANN et al., 2017), neste estudo devido a presença de plantas daninhas e o acúmulo de material orgânico (serapilheira) fornecido pelas árvores (SARTO et al., 2020). Na área experimental, ocorre grande infestação de plantas daninhas e tem sido adotado o controle a partir da roçada mecanizada, exceto no sistema L. Assim, a L apresenta cobertura com plantas daninhas ao longo do ano e este fato, possivelmente, possibilitou maior incremento de COS.

#### 2.6.5 Índice de Qualidade Física do Solo

Os sistemas E e L tiveram as melhores condições físicas do solo, devido as maiores notas das funções físicas do solo em relação aos demais sistemas, assim assumindo as maiores nota do IQFS (FIGURA 13). Estes resultados não corroboraram com outros trabalhos que avaliaram a qualidade física do solo em sistemas integrados, pois geralmente a integração dos componentes favorece as condições físicas do solo quando comparados a cultivos simples (GALZERANO; MORGADO, 2008; LOSS et al., 2014; BONETTI et al., 2017).

Entretanto, a forma como foi conduzido o experimento, ou seja, sem o uso de herbicidas aliado ao não revolvimento, possibilitou a alteração da dinâmica dos componentes sobre o solo. Com isso, o conjunto de práticas adotadas nestes sistemas simples proporcionam qualidade física do solo, tornando-se uma opção de produção agrícola sustentável.

Nas comparações das funções físicas do solo e do índice de qualidade física do solo entre os sistemas avaliados (FIGURA 14), observa-se uma pequena redução de qualidade física do solo na LPF. Provavelmente, se deve ao pisoteio animal, fato observado pela redução do volume de macroporos que, consequentemente, afetou a nota da f(iii) referente a capacidade de aeração do solo.

Entretanto, a ausência do componente animal durante o período da lavoura não foi refletida no IQFS da LPF, pois o componente lavoura é implementado na área no intervalo de três anos e com isso, possivelmente, os efeitos dos componentes P e E predominam por persistirem por um maior período. As gramíneas forrageiras, inclusive a *Panicum maximum*, apresentam sistema radicular agressivo e proporcionam aproximação de partículas do solo, além de liberação de exsudatos que favorecem a microbiota e, consequentemente, a microagregação (VEIGA et al., 2012; DEISS et al., 2016). Assim, possivelmente as características da pastagem, aliada com o eucalipto, suprimem os efeitos da lavoura na área.

A redução do IQFS dos sistemas integrados LPF e PF em relação a E, também pode ser explicada pela presença do pastejo e em razão das alterações morfológicas da pastagem que ocorreram devido à redução da radiação incidente, influenciando assim no comportamento dos animais durante o pastejo (ASSIS et al., 2015; SOUZA et al., 2019). Campos (2019) observou na área experimental do presente estudo que o componente arbóreo diminuiu a relação folha:colmo em relação a P, e o tempo de pastejo dos animais na LPF foi superior quando comparado aos demais sistemas pastejados. O autor afirmou que essa alteração morfológica da forrageira modificou o comportamento alimentar dos animais, fazendo com que os animais realizassem mais bocados para compensar a menor massa de forrageira.

Desta forma, à medida que houve o aumento do tempo de pastejo, consequentemente, aumentou o pisoteio animal que, possivelmente, afetou as propriedades físicas do solo no LPF e PF, principalmente aquelas que integram a função relacionada a capacidade de aeração do solo.

O indicador COS contribuiu para o aumento do índice de estabilidade de agregados e, conseqüentemente, na capacidade de resistir erosão e degradação física em relação de todos os sistemas avaliados (FIGURA 15). Para os sistemas que possuem o componente florestal, Torres et al. (2018) relataram que as florestas de eucalipto proporcionam acúmulo de matéria orgânica do solo a partir da decomposição dos resíduos da parte aérea na superfície do solo, além das plantas espontâneas que crescem sazonalmente entre as árvores, e esse acúmulo de matéria orgânica proporciona agregação do solo.

## 2.7 CONCLUSÕES

Em busca de modelos agrícolas sustentáveis, os sistemas de produção agropecuária livres de pesticidas sob plantio direto promoveram mudanças positivas nas propriedades físicas do solo. Desta forma, podem ser considerados como uma estratégia viável para melhoria e manutenção da qualidade física do solo, além de reduzir os riscos de degradação ambiental e propiciar segurança do alimento.

O componente animal pode ser um fator de redução da qualidade física do solo em razão do pisoteio, visto que os sistemas simples Eucalipto e Lavoura apresentaram melhores condições físicas do solo que os sistemas integrados (SIPAs), contrariando a hipótese do trabalho. Entretanto, os demais sistemas avaliados não apresentaram indicadores impeditivos para o crescimento e desenvolvimento das principais culturas agrícolas.

O índice de qualidade física do solo, por ser um método que pondera e integra indicadores físicos do solo, pode ser capaz de demonstrar as alterações nas funções físicas do solo pelos sistemas de produção agropecuária, e ser adotado como um protocolo de avaliação da qualidade física do solo.

Para identificar a qualidade física do solo com maior eficiência, recomenda-se que os limites dos indicadores que compõem as funções utilizadas no índice sejam ajustados considerando as condições proporcionadas pelo conjunto de práticas aplicadas neste experimento, ou seja, em sistemas de produção agropecuária livres de pesticidas sob plantio direto.



## 2.8 REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, L.; MUNKHOLM, L. J. Eleven Years' Effect of Conservation Practices for Temperate Sandy Loams: II. Soil Pore Characteristics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 2, p. 392–403, 2017.
- ANDREOLLA, V. R. M.; MORAES, A. DE; BONA FILHO, A.; et al. Pastejo e adubação nitrogenada sobre os atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1019–1031, 2016.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 90, p. 25–45. 2002.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality BT - Methods for Assessing Soil Quality. **Methods for Assessing Soil Quality**, v. 49, p. 123–141, 1996.
- ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 138, p. 56–63, 2014.
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; et al. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta crop-livestock-forest systems. , p. 309–316, 2015.
- ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; FILHO, A. C. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 558–568, 2009.
- AULER, A. C.; GALETTO, S. L.; HENNIPMAN, F. S.; et al. Soil structural quality degradation by the increase in grazing intensity in integrated crop-livestock system. **Bragantia**, v. 76, n. 4, p. 550–556, 2017.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, n. April, p. 164–200, 2018.
- BONETTI, J. DE A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. DE; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. DA. Influence of the integrated crop-livestock system on soil and soybean and brachiaria yield | Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 45, n. 1, p. 104–112, 2015.
- BONINI, C. DOS S. B.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; et al. Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1695–1698, 2016.
- BORGES, W. L. B.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 6, p. 2111–2119,

2019.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE-, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 7, p. 221–278, 2011.

BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content Densidade máxima de Neossolos em função do teor de silte. **Ciência Rural**, v. 47, n. 12, 2017.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L. DE; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 2017.

CAMPOS, B. M. Produção de bovinos de corte, características de pasto e comportamento ingestivo em sistemas integrados de produção agropecuária, 2019, 82 p. **Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; DE LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, 370, 2020.

CAVALIERI, K. M. V.; DA SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 158–164, 2009.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 61–69, 2014.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; et al. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, p. 1–26, 2016.

CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. D. S.; FEIGL, B. J.; et al. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 3, p. 255–272, 2018.

COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1026–1035, 2018.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1301-1309, 2011.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 383-390, 2005

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, v. 3, n. 3, p. 261–275, 1983.

FIDALSKI, J.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; ANGHINONI, G.; AULER, P. A. M. Capacidade de Suporte de Carga do Solo em Sistemas de Produção de Laranja Conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 880–885, 2015.

FIGUEIREDO, G. C.; DE SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; et al. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: Modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 2, p. 389–402, 2011.

FLINT, A.L., FLINT, L.E., 2002. Particle Density. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Physical Methods. **Soil Science Society of America**, Madison, Part 4, p. 229–240.

FODOR, N.; SÁNDOR, R.; ORFANUS, T.; LICHNER, L.; RAJKAI, K. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. **Geoderma**, v. 165, n. 1, p. 60–68, 2011.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 62–70, 2014.

FU, B.; L. ZHANG, Z.; XU, Y.; ZHAO, Y.; WEI, A.; SKINNER, D. Ecosystem services in changing land use. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, n. 4, 833–843, 2015.

GEE, G.W., OR, D., 2002. Particle size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Physical Methods. **Soil Science Society of America**, Madison, Part 4, p. 255–293.

GOLDBERG, S.; KAPOOR, B. S.; RHOADES, J. D. Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. **Soil Science**, 1990.

GROSSMAN, R.B & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison, **Soil Science Society of America**, 2002. v.4. p.201-228.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395–403, 2011.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, É. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 4, p. 499–505, 2009.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1–2, p. 105–120, 1990.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71–85, 2000.

HAMILTON, G. J.; BAKKER, D.; AKBAR, G.; et al. Deep blade loosening increases root growth, organic carbon, aeration, drainage, lateral infiltration and productivity. **Geoderma**, v. 345, n. January, p. 72–92, 2019.

HUNT, N. D.; HILL, J. D.; LIEBMAN, M. Reducing Freshwater Toxicity while Maintaining Weed Control, Profits, and Productivity: Effects of Increased Crop Rotation Diversity and Reduced Herbicide Usage. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 1707–1717, 2017.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; DEXTER, A. Factors Contributing to the Tensile Strength and Friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 5, p. 1656–1661, 2002.

JOHANNES, A.; MATTER, A.; SCHULIN, R.; WEISSKOPF, P.; BAVEYE, P.C.; BOIVIN, P. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? **Geoderma** 302, 14–21. 2017.

KADŽIENŽ, G.; MUNKHOLM, L. J.; MUTEGI, J. K. Root growth conditions in the topsoil as affected by tillage intensity. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 66–73, 2011.

KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. **Soil**, v. 2, n. 2, p. 111–128, 2016.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E.; CAMBARDELLA, C. A.; KREMER, R. J.; KING, K. W.; MCCARTY, G. W. Surface soil quality in five midwestern cropland Conservation Effects Assessment Project watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 69, n. 5, p. 393–401, 2014.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 2015.

LAVELLEE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; et al. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v. 105, n. April, 2020.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range in the evaluation of continuous and short-duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 3, p. 415–422, 2004.

LEHMANN, A.; ZHENG, W.; RILLIG, M.C. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 12, 1828–1835. 2017.

LIEBMAN, M.; BARAIBAR, B.; BUCKLEY, Y.; et al. Ecologically sustainable weed

management: How do we get from proof-of-concept to adoption? **Ecological Applications**, v. 26, n. 5, p. 1352–1369, 2016.

LAI, R. L. D. L. Weed dynamics in integrated crop-livestock systems in subtropical, 2020, 91 p. **Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

LIMA, R. L. D. Adensamento populacional da cultura do girassol como estratégia de controle de plantas invasoras em um sistema integrado de produção agropecuária. 2016, 88 p. **Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; DANTAS, D. D.; SILVA, A. R.; MENDONÇA, E. A. Compressive properties and least limiting water range of plough layer and plough pan in sugarcane fields. **Soil Use and Management**. 2020.

LOSS, A. ET AL 2014. Atributos Físicos E Químicos Do Solo Em Sistemas De Consórcio E Sucessão De Lavoura. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1347–1357, 2014.

LUIZ, J.; TORRES, R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações Dos Atributos De Um Latossolo. , p. 437–445, 2011.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária : o estado da arte e inovações tecnológicas. Crop and livestock integration : the state of the art and the near future. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133–146, 2009.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; et al. Evaluation of the infiltration capacity of soils under different types of management | Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 89–98, 2009.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma**, v. 263, p. 47–59, 2016.

MILLINGTON, R. J.; QUIRK, J. P. Permeability of porous solids. **Transactions of the Faraday Society**. v. 57, p. 1200-1207, 1961.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. DE F.; LUSTOSA, S. B. C.; LANG, C. R.; DEISS, L. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 45, n. 5, p. 1024–1031, 2014.

MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C.; FLAMMINI, A.; et al. In situ measurements of soil saturated hydraulic conductivity: Assessment of reliability through rainfall–runoff experiments. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 17, p. 3084–3094, 2017.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI, E.; PETEAN, L. P.; et al. Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico em Sistema de Integração Lavoura-Pecuária. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 2, p. 389–400, 2012.

MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L.; et al. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 160, p. 53–64, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.02.007>>.

MOTA, F. O. B.; NESS, R. L. L.; MOTA, J. C. A.; CLEMENTE, C. A.; SOUSA, S. C. Physical quality of an oxisol under different uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1828–1835, 2012.

MUNKHOLM, L. J. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. **Geoderma**, v. 167–168, p. 236–246, 2011.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 85–91, 2013.

NASCIMENTO, D. M. DO; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; SILVA, A. H. DA; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, n. June 2018, p. 292–299, 2019.

OLIVEIRA, F. C. C.; FERREIRA, G. W. D.; SOUZA, J. L. S.; VIEIRA, M. E. O.; PEDROTTI, A. Soil physical properties and soil organic carbon content in northeast Brazil: Long-term. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 4, 2020.

ORTIZ TORRES, C.; GÓMEZ DÍAZ, J. D.; DOMÍNGUEZ ÁLVAREZ, F. A.; VILLANUEVA MORALES, A. Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo. **Revista Terra Latinoamericana**, v. 36, n. 3, p. 275–285, 2018.

OTTONI FILHO, T. B.; OTTONI, M. V.; OLIVEIRA, M. B.; MACEDO, J. R.; REICHARDT, K. Revisiting Field Capacity (FC): variation of definition of FC and its estimation from pedotransfer functions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, 1750-1764, 2014.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; DE CASTRO, C. R. T.; et al. Productive and nutritional traits of pasture in an agrosilvopastoral system, according to the distance from trees. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1176–1183, 2011.

PAVINATO, P. S.; PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V.; MOREIRA, A.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCE/NEPAR, 2017. 482 p.

PIGNATI, W. A.; LIMA, F. A. N. S. E.; LARA, S. S.; CORREA, M. L. M.; BARBOSA, J. R.; LEÃO, L. H. C.; PIGNATTI, M. G. Spatial distribution of pesticide use in Brazil: a strategy for Health Surveillance, **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 10, 3281–3293, 2017.

POFFENBARGER, H.; ARTZ, G.; DAHLKE, G.; et al. An economic analysis of integrated crop-livestock systems in Iowa, U.S.A. **Agricultural Systems**, v. 157, n.

June, p. 51–69, 2017.

PUE, J.; REZAEI, M.; VAN MEIRVENNE, M.; CORNELIS, W. M. The relevance of measuring saturated hydraulic conductivity: Sensitivity analysis and functional evaluation. **Journal of Hydrology**, v. 576, n. June, p. 628–638, 2019.

RADNADASS, A.; FERNANDES, P.; AVELINO, J.; HABIB, R. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. **Agronomy Sustainable**. v. 32, p. 273–303, 2012.

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 381–384, 2008.

REICHERT, JOSÉ MIGUEL; REINERT, DALVAN JOSÉ; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27, p. 48, 2003.

REICHERT, J. M.; DA ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123–136, 2016.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**. v. 110, p. 131–146, 2002.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3–4, p. 252–263, 2009.

REYNOLDS, W.D. & ELRICK, D.E. 2002. **Falling head soil core (Tank) method**. DANE, J.H. & TOPP, C. Methods of soil analysis. Soil Science Society of America, 809-812p.

RIENZNER, M.; GANDOLFI, C. Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. **Soil and Tillage Research**, v. 135, p. 28–40, 2014.

ROBERTSON, G. P.; GROSS, K. L.; HAMILTON, S. K.; et al. Farming for ecosystem services: An ecological approach to production agriculture. **BioScience**, v. 64, n. 5, p. 404–415, 2014.

RODRIGUES, S.; DA SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade

Ao Ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de anejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 1, p. 105–114, 2011.

SANTOS, M. V.; DA FONSECA, D. M.; DA SILVA, L. D.; et al. Integrated crop–forage–forestry for sustainable agricultural systems: productive performance. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 417–427, 2020.

SARTO, M. V. M.; BORGES, W. L. B.; SARTO, J. R. W.; et al. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, 145, 2020.

SCHLÜTER, S.; ALBRECHT, L.; SCHWÄRZEL, K.; KREISELMEIER, J. Long-term effects of conventional tillage and no-tillage on saturated and near-saturated hydraulic conductivity – Can their prediction be improved by pore metrics obtained with X-ray CT? **Geoderma**, v. 361, 2020.

SCHREINEMACHERS, P.; TIPRAQSA, P. Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries. **Food Policy**, v. 37, n. 6, p. 616–626, 2012.

SENA, K. N.; MALTONI, K. L.; FARIA, G. A.; CASSIOLATO, A. M. R. Organic carbon and physical properties in sandy soil after conversion from degraded pasture to eucalyptus in the Brazilian cerrado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 41, p. 1–15, 2017.

SILVA, A. P. DA; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 4, p. 451–456, 2004.

SILVA, B. E. C.; MEDINA, E. F.; JOLOMBA, M. R. Propriedades físicas do solo em função de diferentes manejos de pastagem. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 7, n. 3, p. 66-75, 2017.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.

SOANE, B. D.; BALL, B. C.; ARVIDSSON, J.; et al. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 118, p. 66–87, 2012.

SOUZA, J. M. Propriedades Físicas do Solo de Áreas Cultivadas com Pastagem e Eucalipto Convertidas de Área da Floresta Atlântica. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 487–492, 2016.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2014.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P.



Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, v. 51, n. 4, p. 311–321, 2013.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; DE LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159–1167, 2007.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 351–362, 2016.

VASILEIADIS, V. P.; OTTO, S.; VAN DIJK, W.; et al. On-farm evaluation of integrated weed management tools for maize production in three different agro-environments in Europe: Agronomic efficacy, herbicide use reduction, and economic sustainability. **European Journal of Agronomy**, v. 63, p. 71–78, 2015.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v. 49, n. 1, p. 73–84, 1998.

WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; STOTT, D. E. Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 24, n. 4, p. 260–266, 2009.

ZHU, G. YU; SHANGGUAN, Z. PING; DENG, L. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. **Catena**, v. 149, p. 253–260, 2017.

### 3 CONCLUSÃO GERAL

Os sistemas de produção agropecuária (Lavoura, Pecuária, Eucalipto, Pecuária-Floresta e Lavoura-Pecuária-Floresta) afetaram a qualidade física e estrutural do solo.

As hipóteses do estudo não foram confirmadas, sendo que os SIPAs não demonstraram as condições físicas e estruturais mais elevadas em relação aos sistemas simples.

Os sistemas de produção agropecuária promoveram adição de carbono orgânico e qualidade estrutural do solo, sendo o sistema Lavoura o que favoreceu os maiores teores de carbono orgânico do solo e melhor condição estrutural do solo.

O índice de qualidade física do solo foi sensível às mudanças promovidas pelos sistemas de produção agropecuária no solo e demonstrou que o sistema simples Eucalipto, juntamente com a Lavoura, apresentaram melhor qualidade física do solo.

O monitoramento da qualidade do solo a partir dos parâmetros físicos e estruturais se torna fundamental nos próximos anos a fim de confirmar esse padrão de comportamento dos componentes dos sistemas de produção agropecuária sobre o aporte da matéria orgânica e qualidade física do solo. Tendo em vista que os ciclos de pastejos, idade das árvores e a diversidade de plantas nos diferentes sistemas ao longo do tempo podem alterar a sustentabilidade do agroecossistema.

### 4 REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI, L.; MUNKHOLM, L. J. Eleven Years' Effect of Conservation Practices for Temperate Sandy Loams: II. Soil Pore Characteristics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 2, p. 392–403, 2017.

ALVARENGA, R. C.; SILVA, V. P.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, M. C. M.; VILELA, L. Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. Informe Agropecuário. 31, 59-67, 2010. and soil physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 23, 6, 454-459, 2019.

ANDREOLLA, V. R. M.; MORAES, A. DE; BONA FILHO, A.; et al. Pastejo e adubação nitrogenada sobre os atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1019–1031, 2016.

ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCANTARA, E. N. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. **Planta Daninha**, 29, 3, 499-513, 2011.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality BT - **Methods for Assessing Soil Quality**. Methods for Assessing Soil Quality, v. 49, p. 123–141, 1996.

ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 138, p. 56–63, 2014.

ASSIS, P. C.R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B.E.; OLIVEIRA, J.M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, 19, 309-316, 2015.

ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; FILHO, A. C. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 558–568, 2009.

AULER, A. C.; GALETTO, S. L.; HENNIPMAN, F. S.; GUNTZEL, E. D.; GIAROLA, N. F.; FONSECA. Soil structural quality degradation by the increase in grazing intensity in integrated crop-livestock system. **Bragantia**. 76, 550-556. 2017.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Relationships between soil quality indicators, redox properties, and bioactivity of humic substances of soils under integrated farming, livestock, and forestry. **Revista Ceres**, 65, 373-380, 2018.

BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, 62, 301-309, 2015.

BALDRIAN, P.; KOHOUT, P. Interactions of saprotrophic fungi with tree roots: can we observe the emergence of novel ectomycorrhizal fungi? **New Phytologist**, 215, 511–513, 2017.

BALIN, N. M.; ZIECH, A. R. D.; OLIVEIRA, J. P. M.; GIRARDELLO, V. C.; STUMPF, L.; CONCEIÇÃO, P. C. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia Agraria**, 18, 85-94, 2017.

BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. de; ROWS, J. R. C. Teores e estoque de carbono em frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo sob integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 3377-3388, 2013.

BAVOSO, M. A.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Resiliência física de dois Latossolos vermelhos sob plantio direto. **Revista**

**Brasileira Ciência Solo**, 36, 1892-1904, 2012.

BELL, L. W.; MOORE, A. D.; KIRKEGAARD, J. A. Evolution in crop-livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia. **European Journal Agronomic**, 57, 10–20, 2014.

BIELUCZYK, W.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; BONETTI, J. D. A.; FREÓ, V. A.; SILVA NETO, E. C. A.; BONETTI, J. Granulometric and oxidizable carbon fractions of soil organic matter in crop-livestock integration systems. **Semina: Ciências Agrárias**, 38, 607–622, 2017.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISID, A.; BERNARDI, A. C.C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; CAMARGO, P. C.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, 371, 2020.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, n. April, p. 164–200, 2018.

BONETTI, J. DE A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. DE; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. DA. Influence of the integrated crop-livestock system on soil and soybean and brachiaria yield | Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 45, n. 1, p. 104–112, 2015.

BONINI, C. DOS S. B.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; et al. Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1695–1698, 2016.

BORGES, W. L. B.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 6, p. 2111–2119, 2019.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 7, p. 221–278, 2011.

BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content Densidade máxima de Neossolos em função do teor de silte. **Ciência Rural**, v. 47, n. 12, 2017.

BU, R.; REN, T.; LEI, M.; LIU, B.; LI, X.; CONG, R.; ZHANG, Y.; LU, J. Tillage and straw-returning practices effect on soil dissolved organic matter, aggregate fraction and bacteria community under rice-rice-rapeseed rotation system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 287, 2020.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G. D.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical

review. **Soil Biology and Biochemistry**, 120, 105–125, 2018.

CALONEGO, J. C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35, 2183-2190, 2011.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L. DE; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 2017.

CAMBARDELLA, S. V.; ELLIOTT, E. T. Particule soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Mandison, 56, 777-783, 1992.

CAMPOS, B. M. Produção de bovinos de corte, características de pasto e comportamento ingestivo em sistemas integrados de produção agropecuária, 2019, 82 p. **Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CASTRO FILHO, C., LOURENÇO, A., DE F. GUIMARÃES, M. e FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**. v.65, n.1, p.45-51. 2002.

CAVALIERI, K. M. V.; DA SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 158–164, 2009.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 61–69, 2014.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; et al. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, p. 1–26, 2016.

CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. D. S.; FEIGL, B. J.; et al. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 3, p. 255–272, 2018.

COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1026–1035, 2018.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; ULIAN, N. A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Acúmulo de nutrientes e tempo de decomposição da palhada de espécies forrageiras em função de épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, Uberlândia, 31, 3, 818-829, 2015.

COTRUFO, M.F., SOONG, J.L., HORTON, A.J., CAMPBELL, E.E., HADDIX, M.L., WALL, D.H., PARTON, W.J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**. 8, 776–779. 2015.

DEXTER, A. R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Agriculture Engineering Research**, 31:139-147, 1985.

DEXTER, A. R. & WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. eds. **Soil and environmental analysis: Physical methods**. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 2000. p.401-430.

DIMASSI, B.; COHAN, J. P.; LABREUCHE, J.; MARY, B. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 169, 12-20, 2013.

DOLLINGER, J.; JOSE, S. Agroforestry for soil health. **Agroforest System**, 92, 213-219, 2018.

DURIGAN, M.R., CHERUBIN, M.R., CAMARGO, P.B., FERREIRA, J.N., BERENGUER, E., GARDNER, T.A., BARLOW, J., DIAS, C.T. DOS S., SIGNOR, D., OLIVEIRA JUNIOR, R.C. DE, CERRI, C.E.P. Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the Eastern Brazilian **Amazon. Sustainability**, 9, 379. 2017.

DUVAL, M. E.; MARTINEZ, J. M.; GALANTINI, J. A. Assessing soil quality indices based on soil organic carbon fractions in different long-term wheat systems under semiarid conditions. **Soil Use and Management**, 00, 1-12, 2019.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, v. 3, n. 3, p. 261–275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 353 p.

FACCIN, F. C.; MARCHETTI, M. E.; SERRA, A. P.; ENSINAS, S. C. Frações granulométricas da matéria orgânica do solo em consórcio de milho safrinha com capim-marandu sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 51, 2000-2009. 2016.

FIDALSKI, J.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; ANGHINONI, G.; AULER, P. A. M. Capacidade de Suporte de Carga do Solo em Sistemas de Produção de Laranja Conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 880–885, 2015.

FIGUEIREDO, G. C.; DE SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; et al. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: Modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.

35, n. 2, p. 389–402, 2011.

FODOR, N.; SÁNDOR, R.; ORFANUS, T.; LICHNER, L.; RAJKAI, K. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. **Geoderma**, v. 165, n. 1, p. 60–68, 2011.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. **European Journal Agronomic**. 57, 62–70. 2014.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 62–70, 2014.

FREDDI, O. S.; TAVANTI, R. F. R.; SOARES, M. B.; ALMEIDA, F. T. D.; PERES, F. S. C. Physical chemical quality of a Latosol under direct seeding and soybean-corn succession in the Cerrado-Amazonian ecotone. **Revista Caatinga**, 30, 991-1000, 2017.

GIACOMINI, Q. Q.; MATTOS, W. T.; MATTOS, H. B.; WERNER, J. C.; CUNHA, E. A.; CARVALHO, D. D. Crescimento de Raízes dos Capins Aruana e Tanzânia Submetidos a Duas Doses de Nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 34, 4, 1109-1120, 2005.

GOLDBERG, S.; KAPOOR, B. S.; RHOADES, J. D. Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. **Soil Science**, 1990.

GOULART, F. F.; CARVALHO-RIBEIRO, S.; SOARES-FILHO, B. Farming-Biodiversity Segregation or Integration? Revisiting Land Sparing versus Land Sharing Debate. **Journal of Environmental Protection**, 7, 2016.

GUEDES FILHO, O.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; MAZZINI-GUEDES, R. B. Boundary line approach applied among crop emergence parameters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 204, 94-101, 2019.

GUEDES FILHO, O.; SILVA, A. P.; TORMENA, A. C. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, 204, 94-101, 2013.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, 27, 395-403, 2011.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, É. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agrícola**, v. 66, n. 4, p. 499–505, 2009.

HADDIX, M. L.; GREGORICH, E. G.; HELGASON, B. L.; JANZEN, H.; ELLERT, B. H.; COTRUFO, F. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil.

**Geoderma**, 363, 2020.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1–2, p. 105–120, 1990.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71–85, 2000.

HAMILTON, G. J.; BAKKER, D.; AKBAR, G.; et al. Deep blade loosening increases root growth, organic carbon, aeration, drainage, lateral infiltration and productivity. **Geoderma**, v. 345, p. 72–92, 2019.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**. 82, 121-145, 2005.

HUNT, N. D.; HILL, J. D.; LIEBMAN, M. Reducing Freshwater Toxicity while Maintaining Weed Control, Profits, and Productivity: Effects of Increased Crop Rotation Diversity and Reduced Herbicide Usage. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 1707–1717, 2017.

IAPAR – Instituto Agronômico do Paraná. **Cartas climáticas básicas do estado do Paraná**. Londrina: Fundação Instituto Agronômico do Paraná; 2013.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; DEXTER, A. Factors Contributing to the Tensile Strength and Friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 5, p. 1656–1661, 2002.

JAT, H. S.; DATTA, A.; CHOUDHARY, M.; YADAV, A. K.; CHOUDHARY, V.; SHARMA, P. C.; GATHALA, M. K.; JAT, M. L.; MCDONALD, A. Effects of tillage, crop establishment and diversification on soil organic carbon, aggregation, aggregate associated carbon and productivity in cereal systems of semi-arid Northwest India, **Soil and Tillage Research**, 190, 128-138, 2019.

KADŽIENŽ, G.; MUNKHOLM, L. J.; MUTEGI, J. K. Root growth conditions in the topsoil as affected by tillage intensity. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 66–73, 2011.

KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. **Soil**, v. 2, n. 2, p. 111–128, 2016.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P. S. Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. **Advances in Agronomy**, 130, 2015.

KRAVCHENKO, A.N., GUBER, A.K., RAZAVI, B.S., KOESTEL, J., QUIGLEY, M.Y., ROBERTSON, G.P., KUZYAKOV, Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. **Nature Community**. 10, 3121. 2019.



LAI, R. L. D. L. Weed dynamics in integrated crop-livestock systems in subtropical, 2020, 91 p. **Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability** (Switzerland), v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 2015.

LAMICHHANE, J. R.; DACHBRODT-SAADEH, S.; KUDSK, P. MESSEAN, A. Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. **Plant Disease**, 100, 1. 2015.

LANGE, M.; EISENHAEUER, N.; SIERRA, C. A.; BESSLER, H.; ENGELS, C.; GRIFFITHS, R. I.; MELLADO-VÁZQUES, P. G.; MALIK, A. A.; ROY, J.; SCHEU, S.; STEINBEISS, S.; THOMSON, B. C.; TRUMBORE, S. E.; GLEIXNER, G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature Communications**, 6, 6707, 2015.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COFRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, 00, 1-13, 2019.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; et al. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v. 105, 2020.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range in the evaluation of continuous and short-duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 3, p. 415–422, 2004.

LEMAIRE, G., FRANZLUEBBERS, A., CARVALHO, P.C. F., DEDIEU, B. Integrated crop- livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agricola Ecosystem Environing**. 190, 4–8. 2014.

LIAO, Y.; WU, W. L.; MENG, F. Q.; SMITH, P.; LAL, R. Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in northern China. **Biogeosciences**, 12, 1403–1413, 2015.

LIEBIG, M. A.; HERRICK, J. E.; ARCHER, D. W.; DOBROWOLSKI, J.; DUIKER, S. W.; FRANZLUEBBERS, A. J.; HENDRICKSON, J. R.; MITCHELL, R.; MOHAMED, A. J. RUSSELL, T. C. Strickland Aligning Land Use with Land Potential: The Role of Integrated Agriculture. **Agricultural & Environmental Letters**, 2017.

LIEBMAN, M.; BARAIBAR, B.; BUCKLEY, Y.; et al. Ecologically sustainable weed management: How do we get from proof-of-concept to adoption? **Ecological Applications**, v. 26, n. 5, p. 1352–1369, 2016.

LIMA, R. L. D. Adensamento populacional da cultura do girassol como estratégia de controle de plantas invasoras em um sistema integrado de produção agropecuária. 2016, 88 p. **Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LOSS, A. ET AL 2014. Atributos Físicos E Químicos Do Solo Em Sistemas De Consórcio E Sucessão De Lavoura. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1347–1357, 2014.

LOSS, A.; RIBEIRO, EC.; PEREIRA, MG.; COSTA, EM. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. **Bioscience Journal**. 30, 1347-1357, 2014.

LUIZ, J.; TORRES, R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações Dos Atributos De Um Latossolo. **Bioscience Journal**, p. 437–445, 2011.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária : o estado da arte e inovações tecnológicas. Crop and livestock integration: the state of the art and the near future. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133–146, 2009.

MARTINEZ, J. M.; GALANTINI, J. A.; DUVAL. A.; LOPEZ, F. M. Soil quality assessment based on soil organic matter pools under long- term tillage systems and following tillage conversion in a semi- humid region. **Soil Use Management**, 00, 1-10, 2020.

MARTINS, D.C.; VILELA, S. D. J.; ALMEIDA, R. G.; ARAUJO, S. A. C.; SILVA, L. D.; PASCHOALOTO, J. R.; MARTINS, P. G. M. A. Animal performance and nutritional characteristics of Piatã-grass in integrated systems. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 72, 3, 1027-1033, 2020.

MAYER, M.; PRESCOTT, C. E.; ABAKER, W. E. A.; AUGUSTO, L.; CECILLON, L.; FERREIRA, G. W. D.; JAMES, J.; JANDL, R.; KATZENSTEINER, K.; LACLAU, J.; LAGANIERE, J.; NOUVELLON, Y.; PARE, D.; STANTURF, J. A.; VANGUELOVA, E. I.; VESTERDAL, L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. **Forest Ecology and Management**, 466, 2020.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; et al. Evaluation of the infiltration capacity of soils under different types of management | Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 89–98, 2009.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma**, v. 263, p. 47–59, 2016.

MORAES, A., DE CARVALHO, P.C. DE F., ANGHINONI, I., LUSTOSA, S.B.C., COSTA, S.E.V.G. DE A., KUNRATH, T.R. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal Agronomic**. 57, 4–9. 2014.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. DE F.; LUSTOSA, S. B. C.; LANG, C. R.; DEISS, L. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 45, n. 5, p. 1024–1031, 2014.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; et al. Soil physical quality on tillage

and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 351–362, 2016.

MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C.; FLAMMINI, A.; et al. In situ measurements of soil saturated hydraulic conductivity: Assessment of reliability through rainfall–runoff experiments. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 17, p. 3084–3094, 2017.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI, E.; PETEAN, L. P.; et al. Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico em Sistema de Integração Lavoura-Pecuária. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 2, p. 389–400, 2012.

MOTA, F. O. B.; NESS, R. L. L.; MOTA, J. C. A.; CLEMENTE, C. A.; SOUSA, S. C. Physical quality of an oxisol under different uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1828–1835, 2012.

MOTT, G.O., LUCAS, H.L. **The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures**. Proceedings of the International Grassland Congress, Pensylvania, State College Press. 6 1380–1395. 1952.

MUNKHOLM, L. J. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. **Geoderma**, v. 167–168, p. 236–246, 2011.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 85–91, 2013.

NASCIMENTO, D. M. DO; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; SILVA, A. H. DA; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, n. June 2018, p. 292–299, 2019.

NEARING, M. A.; XIE, Y.; LIU, B.; YE, Y. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, 5, 77–84. 2017.

NETO, J. F.; SEVERIANO, E. C.; COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; GONÇALVES, W. G.; ANDRADE, R. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. **Acta Science Agronomy**, 37, 375–383, 2015.

NIE, Z.; MCLEAN, T.; CLOUGH, A.; TOCKER, J.; CHRISTY, B.; HARRIS, ROB.; RIFFKIN, P.; CLARK, S.; MCCASKILL, M. Benefits, challenges and opportunities of integrated crop-livestock systems and their potential application in the high rainfall zone of southern Australia: A review. Agriculture, **Ecosystems and Environment**, 235, 17–31. 2016.

NOUMI, V. N.; ZAPFACK, L.; HAMADOU, M. R.; DJONGMO, V. A.; WITANOU, N.; NYECK, B.; NGOSSOMO, J. D.; MBOBDA, R. B. T.; MAPONGMETSEM, P. M. Floristic diversity, carbon storage and ecological services of eucalyptus agrosystems in Cameroon. **Agroforest System**. 92, 239–250, 2018.

OLIVEIRA, F. C. C.; FERREIRA, G. W. D.; SOUZA, J. L. S.; VIEIRA, M. E. O.; PEDROTTI, A. Soil physical properties and soil organic carbon content in northeast

brazil: Long-term. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 4, 2020.

OLIVEIRA, J.M., MADARI, B.E., CARVALHO, M.T.D.M., ASSIS, P.C.R., SILVEIRA, A.L.R., DE LELES LIMA, M., WRUCK, F.J., MEDEIROS, J.C., MACHADO, P.L.O.D.A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**. 18, 105–116. 2018.

ONTL, T. A.; CAMBARDELLA, A. A.; SCHULTE, A. A.; KOLKA, R. K. Factors influencing soil aggregation and particulate organic matter responses to bioenergy crops across a topographic gradient. **Geoderma**, 255-256, 2015.

ORTIZ TORRES, C.; GÓMEZ DÍAZ, J. D.; DOMÍNGUEZ ÁLVAREZ, F. A.; VILLANUEVA MORALES, A. Influencia de Eucalyptus camaldulensis Dehnh y Opuntia ficus-indica L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo. **Revista Terra Latinoamericana**, v. 36, n. 3, p. 275–285, 2018.

OSEI, A. K.; KIMARO, A. A.; PEAK, D.; GILLESPIE, A. W.; VAN REES, K. C. J. Soil carbon stocks in planted woodlots and Ngitili systems in Shinyanga, Tanzania. **Agroforest System**. 92, 251-262, 2018.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; DE CASTRO, C. R. T.; et al. Productive and nutritional traits of pasture in an agrosilvopastoral system, according to the distance from trees. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1176–1183, 2011.

PLAZA-BONILLA, D., ÁLVARO-FUENTES, J., CANTERO-MARTÍNEZ, C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. **Soil Tillage Research**. 139, 19-22. 2014.

POFFENBARGER, H.; ARTZ, G.; DAHLKE, G.; et al. An economic analysis of integrated crop-livestock systems in Iowa, U.S.A. **Agricultural Systems**, v. 157, n. June, p. 51–69, 2017.

POLANIA-HINCAPIE, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, 386, 2021.

PUE, J.; REZAEI, M.; VAN MEIRVENNE, M.; CORNELIS, W. M. The relevance of measuring saturated hydraulic conductivity: Sensitivity analysis and functional evaluation. **Journal of Hydrology**, v. 576, n. June, p. 628–638, 2019.

RADNADASS, A.; FERNANDES, P.; AVELINO, J.; HABIB, R. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. **Agronomy Sustainable**. 32, 273–303, 2012.

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 381–384, 2008.

REICHERT, J. M.; DA ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123–136, 2016.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.

REICHERT, JOSÉ MIGUEL; REINERT, DALVAN JOSÉ; BRAIDA, J. A. SOLOS E SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS AGRÍCOLAS José Miguel Reichert João Alfredo Braida Q UALIDADE DOS. **Ciência & Ambiente**, v. 27, n. March 2015, p. 48, 2003.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3–4, p. 252–263, 2009.

RIBON, A. A.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FERNANDES, K. L.; HERMÓGENES, V. T. L. Alterações na estabilidade de agregados de latossolo e argissolo em função do manejo, na entrelinha da seringueira (*Hevea brasiliensis*). **Revista Árvore**, 38, 1065-1071, 2014.

RIENZNER, M.; GANDOLFI, C. Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. **Soil and Tillage Research**, v. 135, p. 28–40, 2014.

ROBERTSON, G. P.; GROSS, K. L.; HAMILTON, S. K.; LANDEIS, D. A.; SCHMIDT, T. M.; SNAPP, S. S.; SWINTON, S. M. Farming for Ecosystem Services: An Ecological Approach to Production Agriculture. **Bioscience**, 64, 5, 2014.

RODRIGUES, S.; DA SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade Ao Ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de anejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 1, p. 105–114, 2011.

RONG, Q.; CAI, Y.; CHEN, B.; YUE, W.; YIN, X.; TAN, Q. An enhanced export coefficient based optimization model for supporting agricultural nonpoint source pollution mitigation under uncertainty Qiangqiang. **Science of the Total Environmen**. 2017.

SALTON, J. C. Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical. 2005. **Tese (Doutorado em Ciência do Solo)** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALTON, J.C., MIELNICZUK, J., BAYER, C., FABRÍCIO, A.C., MACEDO, M.C.M., BROCH, D.L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 46, 1349–1356. 2011.

SANTOS, M. V.; DA FONSECA, D. M.; DA SILVA, L. D.; et al. Integrated crop–forage–

forestry for sustainable agricultural systems: productive performance. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 417–427, 2020.

SARTO, M. V. M.; BORGES, W. L. B.; SARTO, J. R. W.; et al. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, 145, 2020.

SCHLÜTER, S.; ALBRECHT, L.; SCHWÄRZEL, K.; KREISELMEIER, J. Long-term effects of conventional tillage and no-tillage on saturated and near-saturated hydraulic conductivity – Can their prediction be improved by pore metrics obtained with X-ray CT? **Geoderma**, v. 361, 2020.

SCHREINEMACHERS, P.; TIPRAQSA, P. Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries. **Food Policy**, v. 37, n. 6, p. 616–626, 2012.

SEBEN-JUNIOR, G. F.; CORA, J. E.; LAL, R. Physical quality of an Oxisol under no-tillage subjected to different cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51, 9, 1568-1574, 2016.

SENA, K. N.; MALTONI, K. L.; FARIA, G. A.; CASSIOLATO, A. M. R. Organic carbon and physical properties in sandy soil after conversion from degraded pasture to eucalyptus in the Brazilian cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–15, 2017.

SILVA, A. P. DA; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 4, p. 451–456, 2004.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.

SOANE, B. D.; BALL, B. C.; ARVIDSSON, J.; et al. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 118, p. 66–87, 2012.

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). Núcleo Estadual do Paraná (NEPAR). **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.

SOUZA, J. M. Propriedades Físicas do Solo de Áreas Cultivadas com Pastagem e Eucalipto Convertidas de Área da Floresta Atlântica. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 487–492, 2016.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Soil use and management and its impact on physical quality. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 17, 1301-1309, 2013.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO,

L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2014.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, v. 51, n. 4, p. 311–321, 2013.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; DE LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159–1167, 2007.

TAVANTI, R. F. R.; FREDDI, O.; MARCHIORO, V.; TAVANTI, T. R.; GALINDO, F.; WRUCK, F.; SHIRATSUCHI, L.; BREDA, C. Least limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, 232, 2019.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M.; Organic matter and waterstable aggregates in soils. **Journal Soil Science**. v. 33, p.141-163, 1982.

TREVISAN, R. G.; FREDDI, O. D. S.; WRUCK, F. J.; TAVANTI, R. F. R.; PERES, F. S. C. Variability of physical properties of soil and rice grown under cover crops in crop-livestock integrated system. **Bragantia**, 76, 145-154, 2017.

TURNER, B. L.; KODALI, S. Soil system dynamics for learning about complex, feedback-driven agricultural resource problems: model development, evaluation, and sensitivity analysis of biophysical feedbacks. **Ecological Modelling**, 428, 2020.

VASILEIADIS, V. P.; OTTO, S.; VAN DIJK, W.; et al. On-farm evaluation of integrated weed management tools for maize production in three different agro-environments in Europe: Agronomic efficacy, herbicide use reduction, and economic sustainability. **European Journal of Agronomy**, v. 63, p. 71–78, 2015.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33, 743-755, 2009.

VIAUD, V.; SANTILLAN-CARVANTES, P.; CORFINI-AKKAL, N; GUILLOU, C. L.; PREVOST-BOURE, N. C.; RANJARD, L.; MENASSERI-AUBRY, S. Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 265, 166–177, 2018.

VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K.M. V.; BARTH, G. Silage yield, organic carbon content and physical attributes of a chiseled Ferralsol under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 14, 3, 2019.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v. 49, n. 1, p. 73–84, 1998.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**,

Oxford, v. 49, p. 73-84, 1998.

WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; STOTT, D. E. Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 24, n. 4, p. 260–266, 2009.

ZHU, G. YU; SHANGGUAN, Z. PING; DENG, L. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. **Catena**, v. 149, p. 253–260, 2017.